



ciencia

Revista de la Academia Mexicana de Ciencias

El dengue, una amenaza global

El dengue bajo la lupa: cómo se replica y cómo detenerlo

Manejo integrado de *Aedes* en México

Aedes aegypti en América: la ruta histórica de un mosquito viajero

Cuando los insecticidas dejan de funcionar: el control de los mosquitos en riesgo

"Mosquitos buenos" con *Wolbachia* para combatir el dengue en Yucatán

El funcionamiento oculto de la vida

El papel de los ácidos grasos poliinsaturados en la dieta del camarón de calidad



DESDE LA UAM

- El dengue y el cambio ambiental: una amenaza que crece
- Legos químicos: diseñando armas invisibles contra el dengue
- Ecuaciones contra mosquitos: las matemáticas también son útiles para su control
- La reintroducción del bisonte y la restauración de los pastizales en México





CONSEJO DIRECTIVO
agosto 2023 – agosto 2026

Presidente

José Antonio Seade Kuri

Vicepresidenta

Telma Gloria Castro Romero

Tesorera

Gloria Soberón Chávez

Secretarios

Elva Guadalupe Escobar Briones

Sergio López Ayllón

Presidentes de las Secciones Regionales de la AMC

Sección Noreste: Gloria María González González

Sección Noroeste: María Teresa Viana Castrillón

Sección Centro-Occidente: Alejandro De las Peñas Nava

Sección Centro-Sur: José Ramón Eguibar Cuenca

Sección Sur-Sureste: Dalila Aldana Aranda

ciencia

Revista de la Academia Mexicana de Ciencias

julio-septiembre 2026 volumen 77 número 3

Entre la ciencia y la sociedad

El dengue, una amenaza global

Novedades científicas

Desde la UAM

Reseñas de libros

Desde las redes

Noticias de la AMC

Desde el Comité Editorial <i>Juan Pedro Laclette</i>	3
Conocer al enemigo: el primer paso para combatirlo <i>Laura Vargas-Parada</i>	6
Presentación. El dengue, una amenaza global <i>Victoria Pando-Robles</i>	10
Dengue, el virus que regresa cada año <i>Édgar Quezada Ruiz y Victoria Pando-Robles</i>	12
La transmisión del dengue <i>Guillermo Miguel Ruiz-Palacios y Santos y José Ramos Castañeda</i>	20
El dengue bajo la lupa: cómo se replica y cómo detenerlo <i>Rosa María del Ángel, Magda Lizbeth Benítez Vega y Ricardo Jiménez Camacho</i>	28
Cuatro virus, un mismo dengue: serotipos, respuesta inmune y vacunas <i>Mauricio Rodríguez Álvarez</i>	34
Una historia en evolución: cómo cambian los virus del dengue y qué significa para nuestra salud <i>Blanca Taboada y Selene Zárate</i>	42
<i>Aedes aegypti</i> en América: la ruta histórica de un mosquito viajero <i>Andrea Gloria-Soria y Jacquelyn C. LaReau</i>	50
Cuando los insecticidas dejan de funcionar: el control de los mosquitos en riesgo <i>Adriana E. Flores-Suárez y Selene M. Gutiérrez-Rodríguez</i>	58
"Mosquitos buenos" con <i>Wolbachia</i> para combatir el dengue en Yucatán <i>Pablo Manrique-Saide, Abdiel Martín-Park, Azael Che-Mendoza y Jorge Alfredo Palacio Vargas</i>	66
Manejo integrado de <i>Aedes</i> en México <i>Felipe A. Dzul-Manzanilla y Héctor Gómez-Dantés</i>	74
¿Dengue en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México? Evidencias y preguntas sobre la posibilidad de transmisión local <i>Victoria Pando-Robles, Felipe Dzul y Fabián Correa Morales</i>	80
El funcionamiento oculto de la vida <i>Pablo Siller-Clavel y Ernesto I. Badano</i>	86
El papel de los ácidos grasos poliinsaturados en la dieta del camarón de calidad <i>Anayeli Hernández Sain, Elena Palacios Mechetnov y Crisantema Hernández</i>	92
Desafíos y oportunidades en la adopción de energías renovables: hacia un futuro sostenible <i>Óscar Daniel Lara Montaña, Claudia Gutiérrez Antonio y Manuel Toledano Ayala</i>	100
La borurización: una técnica para aumentar la vida útil de los metales y reducir residuos ambientales <i>Jorge Luis Rosales López, Mauricio Olivares Luna e Iván Enrique Campos Silva</i>	108
El Museo y la Biblioteca de Alejandría <i>José Luis Álvarez García</i>	114
Presentación <i>Dr. Mario De Leo Winkler</i>	122
El dengue y el cambio ambiental: una amenaza que crece <i>Gustavo Manuel Cruz-Bello, José Mauricio Galeana-Pizaña y Aldo Daniel Jiménez-Ortega</i>	123
Legos químicos: diseñando armas invisibles contra el dengue <i>Yorhy A. Amador-Sánchez, Alejandro Islas-Jácome y Eduardo González-Zamora</i>	127
Ecuaciones contra mosquitos: las matemáticas también son útiles para su control <i>Roberto Bernal Jaquez</i>	132
La reintroducción del bisonte y la restauración de los pastizales en México <i>Rurik List, Alejandra Espinosa y Christian Javier Prado Hernández</i>	136
<i>Quiénes son</i> por María Julia Hidalgo López <i>Alonso Fernández-Guasti</i>	141
Reporte especial del Barómetro Edelman sobre confianza y salud 2026 <i>Juan Pedro Laclette</i>	143
Artemis II: un ensayo exitoso hacia la superficie lunar	145
Una herramienta para desenmascarar revistas científicas dudosas	146
Azúcar de emergencia para reparar a las plantas <i>José Eduardo González Reyes</i>	147
	148



Portada: Generada con Firefly.



Separador y contraportada: Generadas con Firefly.

ciencia, revista de la Academia Mexicana de Ciencias, volumen 77, número 3, correspondiente a julio-septiembre de 2026, es una publicación electrónica trimestral, editada y distribuida por la Academia Mexicana de Ciencias, A. C., con domicilio en Casa Tlalpan, km 23.5 de la Carretera Federal México-Cuernavaca, Av. Cipreses S/N, Col. San Andrés Totoltepec, Alcaldía Tlalpan, C. P. 14400, Ciudad de México, tel. 55 5849 4905, www.revistaciencia.amc.edu.mx, rciencia@unam.mx.

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

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

ciencia

Revista de la Academia Mexicana de Ciencias
julio-septiembre 2026 volumen 77 número 3

Director fundador

Ignacio Bolívar Urrutia (1850-1944)

Director

Juan Pedro Laclette

Asesora

Laura Vargas-Parada

Comité editorial

Raúl Antonio Aguilar Roblero
Dalila Aldana Aranda
Raymundo Cea Olivares
Gabriela Dutrénil Bielous
Alonso Fernández Guasti
Gerardo Gamba Ayala
Adolfo Guzmán Arenas
Hugo A. Morales Técotl
Miguel Ángel Pérez de la Mora
Carlos Prieto de Castro
Sergio Sánchez Esquivel
Gina Zabludovsky Kuper

Editora

Rosanela Álvarez Ruiz

Corrección y enlace con autores

Leticia García Urriza

Redes sociales

José Eduardo González Reyes

Diseño y formación

Quinta del Agua Ediciones, S.A. de C.V.

Ilustraciones

Ana Viniegra, pp.: 7, 13, 21, 51, 59, 75, 81, 87, 93, 115

Pixabay: pp.: 8, 10, 19, 78, 91, 96, 97, 101, 106

Firefly (IA generativa de Adobe): pp. 3, 29, 35, 40, 43, 48, 55, 62, 63, 72, 85, 109, 111, 126, 128, 133, 134, 137

Freepik: pp.: 88

Portal de la revista *Ciencia*, AMC

Walter Galván Tejada

Academia Mexicana de Ciencias, A.C.

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

www.revistaciencia.amc.edu.mx



@CienciaAMC



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



Casa abierta al tiempo
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

Desde el Comité Editorial



Hacemos entrega en este volumen 77-3 de un número temático dedicado al dengue, que es una enfermedad viral transmitida por un mosquito del género *Aedes*, ya establecida desde hace décadas en nuestro país, pero que genera nuevos retos a la salud pública, debido a su dispersión en la mayor parte de las zonas tropicales y semitropicales de nuestro territorio, a su conquista de nuevas áreas debido al cambio climático y a su confluencia con otras dos enfermedades virales: zika y chikungunya.



En la elaboración de este número hemos contado con la participación de Victoria Pando-López como editora huésped invitada, quien ha convocado a un grupo de distinguidos especialistas del Instituto Nacional de Salud Pública, del Instituto Nacional de Ciencias Médicas y de la Nutrición, del Centro de Investigación y Estudios Avanzados, de la Universidad Nacional Autónoma de México, de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, de la Universidad Autónoma de Nuevo León, de la Universidad Autónoma de Yucatán, de los Servicios de Salud de Yucatán, del Centro Nacional de Control y Prevención de Enfermedades del gobierno federal, además del Center for Vector Biology & Zoonotic Diseases y del Department of Environmental Sciences de los Estados Unidos de América. A estas diez contribuciones se suman tres más de académicos, igualmente distinguidos, de la Universidad Autónoma Metropolitana.

Como primera innovación, introducimos una nueva sección que intitulamos “Entre la ciencia y la sociedad”, a cargo de Laura Vargas-Parada, que pretende proveer un puente que facilite la aproximación de nuestros lectores al capitulado dedicado al dengue. El texto menciona aspectos de la enfermedad en forma anecdótica y proporciona hipervínculos a los capítulos que analizan cada uno. Posteriormente aparece la introducción de la propia editora huésped invitada. En conjunto, este número temático constituye una extraordinaria colección de textos multidisciplinarios que, sin duda, se convertirán en una referencia obligada para todos aquellos que quieran conseguir información confiable y actualizada de esta arbovirosis (enfermedad viral transmitida por un vector artrópodo), que constituye un reto de primera magnitud para la salud pública de nuestro país.

A continuación de la sección temática aparecen algunos artículos de novedades científicas de considerable interés. El primero de ellos proviene del grupo de E. I. Badano del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, en el que se enfatiza que la degradación ambiental causada por actividades humanas pone cada vez mayor presión al funcionamiento de los ecosistemas y sus servicios ambientales. También forma parte de esta sección,

una contribución del grupo de C. Hernández, del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, que nos habla del contenido de ácidos grasos poliinsaturados del camarón y de su relevancia para la nutrición humana. Posteriormente, el artículo del grupo de M. Lara-Toledano, de la Universidad Autónoma de Querétaro, describe los pros y contras de diversas energías renovables, enfatizando la importancia del desarrollo de políticas públicas que promuevan su pronta adopción en nuestro país. A continuación, nos introducimos en la ciencia de los materiales a través del texto del grupo de E. Campos Silva en el que nos pone al tanto de los desarrollos recientes de la borurización de los metales, procedimiento que permite alargar su vida útil, lo que constituye un asunto de gran importancia dado el uso extensivo de metales en nuestras construcciones. Aparece también una nueva contribución de J. L. Álvarez García de la Universidad Nacional Autónoma de México, en la que nos relata los asombrosos avances en el conocimiento que ocurrieron en la legendaria Biblioteca de Alejandría. Por último, en la sección Desde la UAM, el grupo de R. List describe los avances en la reintroducción del bison americano en varios estados en el norte de nuestro país, y los beneficios que de su actividad resultan para la restauración de ecosistemas de pastizales.

Una segunda innovación en la presentación de todos los capítulos temáticos y de novedades científicas, es la introducción de una traducción al inglés del resumen, con el cual pretendemos atender y atraer la curiosidad de lectores de otras lenguas, que revisan el contenido de nuestra revista a través del internet.

Quisiera también hacer notar que en este número retomamos la sección de Reseñas de Libros, a través de un par de recomendaciones. Aprovecho la oportunidad para invitar a nuestros lectores a que envíen nuevas contribuciones y se enriquezca esta sección, con el propósito de mantener a nuestra comunidad al tanto de los avances en diversas disciplinas a través de este formato. Los contenidos del número concluyen con las noticias de las redes sociales y de la Academia Mexicana de Ciencias, en las que

se informa del sensible fallecimiento de la doctora Deborah Dultzin, distinguida académica y miembro del Comité Editorial de nuestra revista.

Asimismo, informamos que hemos introducido una serie de actualizaciones a nuestra Política Editorial, que ya aparecen publicadas en el portal de la revista *Ciencia*. Se trata de modificaciones discretas que pretenden dar mayor claridad a la misión de nuestra revista. Una última y relevante información acerca del funcionamiento de nuestra revista, es la adopción del formato de ojs (Open Journal System) para operar el envío y procesamiento de los manuscritos. Nuestro objetivo es lograr la operatividad to-

tal por medio del ojs, a partir del primer número de 2027. Los mantendremos informados de los avances. Estamos convencidos de que este sistema permitirá un manejo más confiable y expedito de los envíos, proveyendo también un mecanismo para el respaldo completo de los documentos que se generan en el proceso de publicación de los artículos.

Concluyo este editorial agradeciendo el generoso apoyo económico de la Universidad Autónoma Metropolitana para la publicación del presente número.

JUAN PEDRO LACLETTE

Laura Vargas-Parada



Conocer al enemigo: el primer paso para combartirlo

Nadie que se haya enfermado de dengue olvida lo que se siente. Conocida en muchos lugares como la fiebre rompe huesos, el nombre lo dice todo: “Fue una experiencia muy fuerte porque siempre he sido sano y nunca imaginé sentirme tan mal como para ir al hospital”, dice Raúl Ferreira Pando, estudiante de Animación Digital de 19 años, quien enfermó en febrero de 2023, cuando cursaba el primer año de preparatoria en Cuernavaca, Morelos. “Me sentía morir, me pesaba el cuerpo y los músculos me dolían como si hubiera hecho mucho ejercicio, no podía sostenerme en pie”.

Comenzó con un malestar general, como si se hubiera resfriado. Pero luego de unas horas, se sintió sofocado y con mucho calor, tanto como para sacar hielo del refrigerador y ponérselo en la cara y cuello. Recostado en el sillón de la sala, sentía cómo perdía la conciencia por largos ratos; agotado, no tenía fuerzas ni para mirar el celular. Su ropa estaba empapada. Su familia decidió llevarlo a la Cruz Roja, donde recibió suero porque estaba muy deshidratado, y medicina contra la fiebre, aunque “no lograron bajarla del todo”.

Raúl es afortunado, tanto él como su familia sospechaban que tenía dengue y actuaron de inmediato. “Pensé que era dengue porque recordaba bien que no hacía mucho me había picado un mosquito en el cuello al salir a pasear a mi perro por la noche”, dice. Son pocos los estudiantes de preparatoria que saben de la enfermedad. Raúl lleva ventaja: su mamá, Victoria Pando-Robles, es viróloga, estudia el dengue y otros virus transmitidos por mosquitos en el Centro de Investigación Sobre Enfermedades Infecciosas del Instituto Nacional de Salud Pública (véase “Dengue, el virus que regresa cada año”).

Una prueba molecular realizada por Pando-Robles en su laboratorio, y una inmunológica que tardó unos días, realizada en un laboratorio clínico privado, confirmaron las sospechas. La prueba molecular determinó que Raúl se había infectado con el serotipo DENV-2. No existe un tratamiento específico contra el dengue. “No hay antivirales, el dengue se trata vigilando la evolución de los enfermos e identificando señales de alarma oportunamente”, dice Mauricio Rodríguez Álvarez, médico, microbiólogo y especialista en vacunas de la Facultad de Medicina de la UNAM. De requerirse, se dan medicamentos para tratar los síntomas, como la fiebre, el dolor o la deshidratación.



No contamos con antivirales porque el virus del dengue es más complejo de lo que parece, dice la viróloga Rosa María del Ángel, del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN. “Existen cuatro serotipos diferentes (DENV-1, DENV-2, DENV-3 y DENV-4), capaces de causar la enfermedad, por lo que un tratamiento ideal debe ser efectivo contra todos ellos. Además, el virus utiliza muchos procesos de nuestras propias células para multiplicarse, lo que dificulta encontrar medicamentos que lo bloqueen sin afectar al paciente (véase ‘[El dengue bajo la lupa](#)’). En el laboratorio de Del Ángel estudian cómo el virus modifica procesos celulares para poder multiplicarse y con ese conocimiento buscan posibles tratamientos. “Hemos encontrado que algunos medicamentos ya aprobados para otras enfermedades, como la metformina, la ivermectina y la atorvastatina, pueden disminuir la infección por dengue en modelos experimentales en células y animales”. Al estudiar mecanismos celulares compartidos por los cuatro serotipos del virus, aumenta la posibilidad de encontrar un tratamiento de amplio espectro.

En el caso de las vacunas, hay dos que han mostrado eficacia y seguridad aceptables, explica Rodríguez Álvarez (véase “[Cuatro virus, un mismo dengue](#)”). “En algunos países la vacuna está indicada para personas de 6 a 16 años que viven en zonas con alta transmisión y que ya han tenido la enfermedad previamente”. Sin embargo, “en México todavía no se define cómo será el uso de la vacuna contra el dengue”.

A Pando-Robles la enfermedad de Raúl la tomó por sorpresa porque su hijo es muy joven y no suele esperarse que la enfermedad se presente con tanta severidad en una primera vez. “La respuesta clínica al dengue depende de factores como el tipo y cantidad de virus inoculados y la regulación del sistema inmune”, dice Rodríguez Álvarez. Así, una persona joven y sana está expuesta a presentar síntomas severos que los trabajadores de la salud podrían pasar por alto porque los síntomas suelen confundirse, como en el caso de Raúl, con un resfriado fuerte. Otra población que no debemos perder de vista, porque es más vulnerable a enfermarse gravemente, son las personas con hipertensión o diabetes, explica Pando-Robles.

La realidad es que todos debemos considerar al dengue como una enfermedad que podemos padecer porque los patrones de transmisión están cambiando. Los casos van en aumento alrededor del mundo, no sólo en los lugares donde regularmente se transmite la enfermedad, sino también en lugares donde no se había visto la enfermedad antes, como Francia o Italia. En 2024 se rompieron récords en el número de casos en el mundo. En la Ciudad de México ya se ha documentado la presencia del mosquito transmisor a una altitud donde no se había encontrado antes (véase “[¿Dengue en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México?](#)”).

Estamos “transitando de áreas endémicas en regiones tropicales o subtropicales a regiones templadas y secas por efectos del cambio climático”, dice el virólogo José Ramos Castañeda del Instituto Nacional de Salud Pública. Para comprender mejor los cambios en la transmisión del dengue se utilizan modelos matemáticos que se modifican y ajustan para incluir nuevas variables que describan mejor la compleja dinámica de la transmisión, explica (véase “[La transmisión del dengue](#)”). Tres componentes son clave: tipos de virus en circulación, inmunidad de la población y la actividad de los mosquitos transmisores.

Usando un modelo que “caracteriza las diferencias en la intensidad de transmisión de los diferentes serotipos”, Castañeda y colaboradores han podido comprender mejor los cambios en los patrones de transmisión del virus en México entre 2016 y 2023.



Dando la batalla

Una forma de seguir la pista a los virus es la vigilancia genómica. Los cuatro serotipos del virus del dengue pueden sufrir cambios con el tiempo para dar lugar a linajes o subdivisiones dentro de un mismo serotipo. “La vigilancia genómica permite saber si los virus están cambiando, si llegan nuevos linajes y cómo se dispersan entre regiones”, dice Blanca Taiboadá, especialista en biología computacional y evolución de virus del Instituto de Biotecnología de la UNAM. “Conocer de dónde viene un virus y cómo ha cambiado a lo largo del tiempo ayuda a entender por qué puede infectar a ciertos hospederos, cómo logra

transmitirse y qué factores favorecen su expansión”. En su laboratorio, Taboada y colaboradores comparan el material genético de los virus para detectar cambios en los serotipos, así como la aparición de nuevos linajes (véase [“Una historia en evolución”](#)). De esta forma se detectó que hasta 2022 los serotipos predominantes en México eran el DENV-1 y DENV-2, pero gradualmente han sido sustituidos por el DENV-3, serotipo que en 2024 se convirtió en el más común en territorio nacional. Comparando los genomas, Taboada y su equipo pudieron demostrar “que el aumento reciente del DENV-3 estuvo asociado con la expansión de linajes virales distintos” y que no es el mismo DENV-3 que circulaba antes en el país, lo que podría explicar el mayor número de hospitalizaciones y signos de alarma.

En 2023 el estado de Morelos experimentó un aumento significativo en los casos de dengue, colocando a la entidad entre los cinco estados con mayor número de reportes estimados a nivel nacional. Raúl fue uno de los afectados, ¡y volvió a enfermar de dengue en septiembre! En esta segunda ocasión fue con el serotipo DENV-3, lo que coincide con la observación de que el tipo de serotipo predominante en el país estaba cambiando. Afortunadamente, sus síntomas fueron mucho menos graves que la primera vez, lo cual no evitó que sufriera ansiedad por el temor a desarrollar dengue severo. Algo que afortunadamente no ocurrió.

Para Andrea Gloria-Soria, bióloga evolutiva del Center for Vector Biology & Zoonotic Diseases, Connecticut Agricultural Experiment Station, EUA, estudiar el movimiento de mosquitos transmisores de enfermedades infecciosas hacia nuevos territorios, sus estrategias de supervivencia y capacidad de respuesta a cambios repentinos, puede ayudar a prevenir una nueva epidemia. “La entomología nos permite predecir si una especie que ha llegado por primera vez a un territorio será capaz de sobrevivir y cuáles serían las circunstancias que podrían ayudar a su establecimiento”, explica (véase [“Aedes aegypti en América: la ruta histórica de un mosquito viajero”](#)).

Algo importante es saber que en el ambiente urbano todos podemos ayudar a reducir las poblaciones de mosquitos alrededor de nuestras viviendas. “Los

mosquitos transmisores del dengue completan su ciclo de vida en el agua acumulada en recipientes artificiales como bases de macetas, platos de mascotas, chapoteaderos olvidados, llantas y desechos plásticos”, dice Gloria-Soria. Eliminar estos ambientes, desechando la basura, drenando y limpiando regularmente estos recipientes al aire libre, es una forma de evitar que el mosquito pueda reproducirse.

Otra forma de control, aunque controvertida, son los insecticidas. Adriana Flores-Suárez, entomóloga médica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, considera que los insecticidas son sólo una parte de las estrategias de control. “La eliminación de criaderos, la participación de la comunidad, la vigilancia de las poblaciones de mosquitos y el uso racional de los insecticidas permiten construir estrategias más efectivas a largo plazo”, dice (véase [“Cuando los insecticidas dejan de funcionar”](#)). “Los insecticidas ni son tan malos como a veces se afirma, ni son la solución perfecta”.

Los insecticidas se utilizan desde la década de 1970 como estrategia de control en casas y mosquiteros, pero perdieron efectividad cuando los mosquitos evolucionaron para sobrevivir a ellos volviéndose resistentes. El control químico es una herramienta útil para disminuir la transmisión de enfermedades que afectan a millones de personas, pero deben emplearse con el conocimiento científico adecuado que permite saber “cuándo usarlos, cuáles funcionan mejor y cómo evitar que pierdan efectividad, para aprovechar sus beneficios sin depender exclusivamente de ellos”, explica Flores-Suárez.

La respuesta está en una aproximación integral para enfrentar el problema. Para Pando-Robles, “la salud pública no depende únicamente de las intervenciones científicas o institucionales; es importante la participación de la sociedad en la prevención de enfermedades”. Aquí es donde entramos nosotros, los ciudadanos. Raúl lo deja claro: “no recomiendo para nada la experiencia [de enfermarse], no hay que olvidar que hay gente que muere por esta enfermedad”.

Estar informados nos permite tomar mejores decisiones, algunas de las cuales pueden, incluso, salvarnos la vida.

Victoria Pando-Robles



Presentación

El dengue, una amenaza global

El dengue y otras arbovirosis emergentes como el zika, la chikungunya, la fiebre amarilla, la fiebre de Oropouche, entre otras, representan un importante reto para la salud pública en México y el mundo. Los arbovirus son transmitidos por artrópodos; entre ellos, el virus del dengue destaca por su amplia distribución global, sobre todo debido a la propagación de su vector principal, el mosquito *Aedes aegypti*.

En las últimas décadas, el aumento de la temperatura a consecuencia del cambio climático, el crecimiento urbano acelerado y la intensificación de la movilidad humana han ampliado las zonas donde este mosquito puede sobrevivir y repro-



ducirse, favoreciendo la expansión del virus hacia regiones que antes se consideraban de bajo riesgo.

En este número temático se abordan los aspectos fundamentales de la enfermedad, el virus del dengue y las vacunas. Asimismo, se describe la llegada a América del mosquito *Aedes aegypti*, su capacidad de adaptación, los sistemas de vigilancia epidemiológica para controlarlo y se destacan los avances en los métodos innovadores de control y prevención, como el uso de la bacteria *Wolbachia*.

Por otra parte, se subraya la importancia de la educación y la concienciación comunitaria. La salud pública no depende únicamente de las intervenciones científicas o institucionales, es importante la participación activa de la sociedad en la prevención de enfermedades. El combate al dengue en México requiere un enfoque integral que combine la investigación científica, la vigilancia epidemiológica, las políticas públicas basadas en evidencia y la educación para la salud.

Invitamos a los lectores de la revista *Ciencia* a que revisen y reflexionen sobre la necesidad de integrar

el conocimiento científico con la acción comunitaria y los esfuerzos de salud pública. Sólo mediante este trabajo conjunto será posible reducir significativamente el impacto de los arbovirus y mejorar el bienestar de nuestras comunidades. Este número pretende constituir una referencia asequible para los estudiantes interesados en el dengue.

Este número temático surge como resultado del curso-taller “Nuevos conocimientos sobre el dengue y otros arbovirus: de la biología molecular a la salud pública”, impartido a finales de 2024 en el Instituto Nacional de Salud Pública y financiado por el Programa de Biotecnología para América Latina y el Caribe de la Universidad de las Naciones Unidas, el Global Health Institute-University of Wisconsin, la Sociedad Mexicana de Virología y Takeda-México.

Victoria Pando-Robles

Centro de Investigación Sobre Enfermedades Infecciosas, Instituto Nacional de Salud Pública, Cuernavaca, Morelos.

victoria.pando@insp.mx

Édgar Quezada Ruiz y Victoria Pando-Robles



Dengue, el virus que regresa cada año

Resumen

El dengue es una enfermedad infecciosa causada por un virus que se transmite a las personas mediante la picadura de mosquitos infectados, principalmente *Aedes aegypti*, un insecto estrechamente adaptado a vivir con las personas. En las últimas dos décadas, los casos de dengue reportados a nivel global aumentaron de poco más de 500 000 en el año 2000 a 14.6 millones en 2024, según la Organización Mundial de la Salud. Este incremento refleja la rápida expansión del dengue y la creciente necesidad de fortalecer las medidas de prevención y control.

Abstract

Dengue is an infectious disease caused by a virus transmitted to humans through the bite of infected mosquitoes, primarily *Aedes aegypti*, an insect highly adapted to living alongside humans. In the last two decades, reported cases worldwide have increased from just over 500 000 in 2000 to 14.6 million in 2024, according to the World Health Organization. This increase reflects the rapid spread of dengue and the growing need to strengthen prevention and control strategies.

Cada año millones de personas en el mundo enferman por virus transmitidos por mosquitos. Entre estas enfermedades se encuentran el dengue, el zika, la chikungunya y la fiebre amarilla, conocidas también como arbovirosis. Su nombre proviene del inglés “arthropod-borne viruses”; es decir, virus transmitidos por artrópodos. Aunque pueden parecer problemas lejanos, estas infecciones representan hoy uno de los mayores desafíos de la salud pública mundial, debido a su capacidad de provocar brotes masivos en poco tiempo. Recordemos cómo se diseminó la chikungunya en nuestro país en el 2014 y el zika en el 2015.

De todas ellas, el dengue es la arbovirosis más ampliamente distribuida en el planeta. Está presente en las regiones tropicales y subtropicales de América,



África, Oriente Medio, Asia y las islas del Pacífico. Se calcula que cerca de la mitad de la población mundial, alrededor de 4000 millones de personas, viven en zonas donde existe riesgo de infección.

El responsable de esta enfermedad es el virus del dengue (DENV, por sus siglas en inglés), que no es uno solo, sino que presenta cuatro versiones distintas llamadas serotipos: DENV-1, DENV-2, DENV-3 y DENV-4. Nuestro sistema inmunológico los reconoce como si fueran virus diferentes. Por eso una persona que se infecta desarrolla una protección duradera contra ese mismo serotipo, pero sólo una inmunidad parcial y pasajera frente a los demás. En regiones donde circulan varios serotipos al mismo tiempo, las reinfecciones son relativamente frecuentes.

A diferencia de enfermedades respiratorias como la influenza o el COVID-19, el dengue no se transmite

directamente de persona a persona. El virus necesita un intermediario: los mosquitos del género *Aedes*. En las ciudades el principal responsable es el *Aedes aegypti*, mientras que el *Aedes albopictus* participa en zonas rurales o semiurbanas (Figura 1).

Vector
Organismo vivo que transmite un agente infeccioso de una persona a otra.

Un mosquito perfectamente adaptado a vivir con nosotros

El éxito del dengue está estrechamente ligado al estilo de vida de su **vector**. El mosquito *Aedes aegypti* no llegó a convertirse en el principal transmisor del virus del dengue por casualidad: ha desarrollado características que lo hacen especialmente compatible con los entornos humanos.

Primero, tiene una fuerte preferencia por la sangre humana, un rasgo conocido como antropofilia (del griego *anthropos*-ser humano y *philia*-afinidad). Esto aumenta la probabilidad de que el virus pase de una persona infectada a otra sana en espacios densamente poblados.

A diferencia de muchos insectos que asociamos con la naturaleza silvestre, el *Aedes aegypti* es un mosquito casi doméstico, “hogareño”. Vive dentro de las casas o muy cerca de ellas, donde encuentra sombra, humedad y alimento. No necesita selvas ni pantanos para reproducirse: cualquier recipiente con agua acumulada por actividades humanas, como floreros, cubetas o tinacos, puede convertirse en su criadero.

Sus huevos poseen otra ventaja sorprendente: pueden resistir meses en condiciones de sequedad, adheridos a las paredes de los recipientes; cuando vuelve el agua, por lluvias o almacenamiento doméstico, estos huevos eclosionan rápidamente, reiniciando el ciclo.

Existe un detalle más que favorece la transmisión: una sola hembra puede picar a varias personas durante una misma fase de alimentación. Así, un mosquito infectado puede originar pequeños brotes dentro de una familia o comunidad.

Por otro lado, el aumento del riesgo de propagación del dengue está asociado a diversos factores. Entre ellos destacan el cambio climático, que ha producido temperaturas más altas y periodos de llu-



Figura 1. Principales vectores del virus del dengue: *Aedes albopictus* y *Aedes aegypti*. Se muestran los hábitats donde vive el mosquito y las características morfológicas de las principales partes de su cuerpo. Fotografías: James Gathany / Centers for Disease Control and Prevention.

vias más intensos; la urbanización no planificada; las deficiencias en los servicios de saneamiento, especialmente en el acceso al agua, y la alta movilidad poblacional. En conjunto, estos factores facilitan la reproducción y expansión del mosquito vector.

El viaje del virus del dengue: de una persona al mosquito y a otra persona

Los mosquitos no nacen infectados. Sólo en casos muy poco frecuentes el virus puede transmitirse de la madre a sus huevos (aproximadamente 1 de cada 1 000). Por lo general, el ciclo comienza cuando una hembra de *Aedes aegypti* pica a una persona que tiene el virus circulando en la sangre. Esta persona puede presentar síntomas, encontrarse en una fase previa a su aparición (presintomática), o incluso no mostrar signos de la enfermedad (asintomática).

Tras ingerir el vector sangre infectada, el virus inicia un proceso silencioso dentro del mosquito. Primero se multiplica en el intestino y posteriormente alcanza las glándulas salivales. Este proceso dura

entre 8 y 12 días, dependiendo de la temperatura ambiental, y se conoce como periodo de **incubación extrínseca**. A partir de entonces, el mosquito puede transmitir el virus a través de su saliva cuando vuelve a alimentarse de la sangre de una persona sana.

Las hembras del *Aedes aegypti* se alimentan de sangre porque necesitan proteínas, hierro y aminoácidos para el desarrollo y la maduración de sus huevos; sin estos nutrientes no pueden reproducirse. Los machos, en cambio, se alimentan únicamente de néctar y otras fuentes de azúcar, por lo que no participan en la transmisión del virus.

Resaltamos que el virus del dengue a menudo viaja de incógnito. En las zonas endémicas (donde ocurren muchos casos de dengue), el porcentaje de infecciones asintomáticas es de entre 60 y 80 %. Es decir, una persona puede haber sido infectada y no saberlo, porque no presentó síntomas; no obstante, puede contribuir a la transmisión del virus del dengue.

Todo inicia con una picadura que generalmente pasa desapercibida. Mientras el mosquito hembra se alimenta, libera saliva en la piel para evitar la coagula-

Incubación extrínseca

Es el tiempo que pasa desde que el mosquito adquiere el virus al picar a una persona infectada hasta que el virus se multiplica y llega a sus glándulas salivales, permitiéndole transmitir la infección a otras personas. Suele durar entre 8 y 12 días.

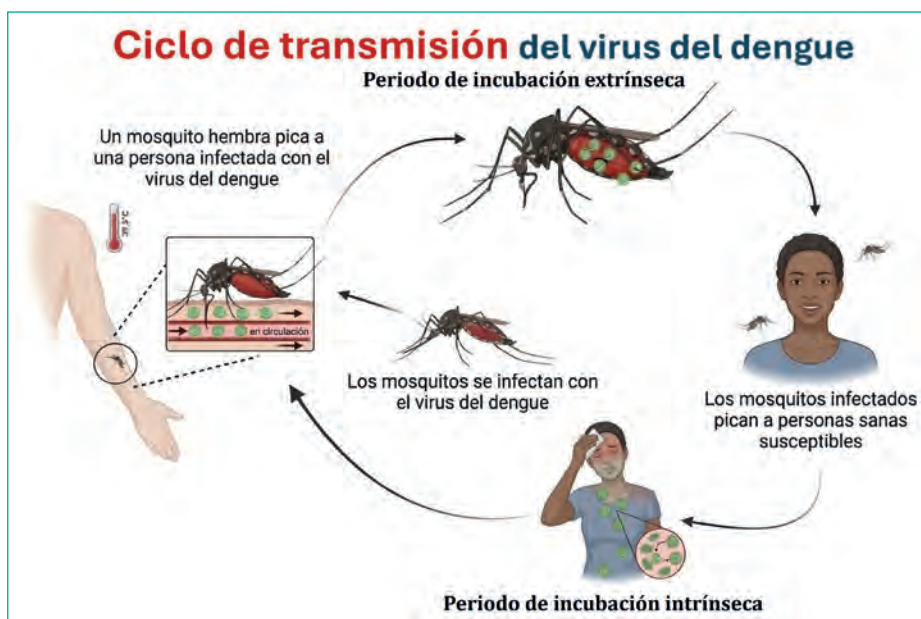


Figura 2. Tras ingerir el vector sangre infectada, el virus inicia un proceso silencioso dentro del mosquito. Primero se multiplica en el intestino y posteriormente alcanza las glándulas salivales. Este proceso dura entre 8 y 12 días, dependiendo de la temperatura ambiental, y se conoce como periodo de incubación extrínseca. A partir de entonces, el mosquito puede transmitir el virus a través de su saliva cuando vuelve a alimentarse de la sangre de una persona sana. Cuando el virus entra al cuerpo humano comienza una nueva etapa. Antes de que aparezcan los síntomas, el patógeno debe multiplicarse y diseminarse por el organismo, un proceso que suele durar entre 3 y 14 días (con un promedio de 4 a 7). Este intervalo se denomina periodo de incubación intrínseca.

ción de la sangre; si el mosquito está infectado, el virus del dengue entrará al organismo de la persona sana.

Durante los primeros días, el virus se multiplica silenciosamente, sobre todo en células del sistema inmunológico, y circula por el torrente sanguíneo. Esta etapa recibe el nombre de fase virémica y es precisamente cuando una persona infectada puede transmitir el virus a nuevos mosquitos, perpetuando el ciclo de transmisión.

El sistema inmunológico responde rápidamente liberando moléculas inflamatorias para combatir la infección. Esta reacción es la responsable de muchos de los síntomas característicos del dengue: fiebre alta, dolor de cabeza intenso, molestias detrás de los ojos, y dolores musculares y articulares, motivo por el cual la enfermedad también se conoce como *fiebre quebrantahuesos*.

En la mayoría de los casos, el sistema inmune controla la infección y la persona se recupera después de algunos días. Sin embargo, en una minoría de individuos la respuesta inflamatoria puede intensificarse y afectar el funcionamiento normal de los vasos sanguíneos, lo que puede dar lugar a formas graves de la enfermedad.

Las tres fases del dengue

Aunque cada persona puede experimentar la enfermedad de manera distinta, los médicos describen el dengue en tres etapas principales:

1. *Fase febril*: dura entre 2 y 7 días, aparece de forma repentina una fiebre alta (39-40 °C) acompañada de dolor de cabeza, cansancio intenso, dolor muscular y articular, náuseas o sarpullido. Esta etapa puede confundirse fácilmente con otras infecciones virales.
2. *Fase crítica*: ocurre generalmente cuando la fiebre comienza a bajar, lo que puede dar una falsa sensación de mejoría. En algunos pacientes, las paredes de los vasos sanguíneos se vuelven “porosas”, lo que permite que el líquido de la sangre (el plasma) se escape hacia los tejidos circundantes. Si no se detecta a tiempo, esto puede provocar complicaciones graves.

3. *Fase de recuperación*: si la persona recibe vigilancia médica adecuada, el organismo reabsorbe los líquidos y los síntomas disminuyen gradualmente. El apetito regresa y la energía se recupera poco a poco, aunque el cansancio puede persistir varios días o semanas.

Si presentas síntomas compatibles con dengue, es fundamental buscar atención médica lo antes posible, sobre todo si aparecen signos de alarma. El diagnóstico se confirma mediante pruebas de laboratorio que detectan el virus o los anticuerpos específicos.

No existe un tratamiento antiviral específico, por lo que el manejo se basa en el control de síntomas (como la fiebre y el dolor), hidratación y vigilancia estrecha para prevenir complicaciones.

De acuerdo con la clasificación recomendada por la Organización Mundial de la Salud, el dengue con síntomas clínicos se divide en:

- *Dengue sin signos de alarma* (o dengue no grave). La persona presenta fiebre y síntomas típicos de la enfermedad sin complicaciones adicionales.
- *Dengue con signos de alarma*. Cuando la fiebre disminuye pueden aparecer manifestaciones como dolor o sensibilidad abdominal intensa, vómitos persistentes, sangrado de mucosas o agrandamiento del hígado (**Figura 3**).
- *Dengue grave*. Se caracteriza por fuga grave de plasma, sangrado importante o daño en órganos vitales.

Esta clasificación permite determinar cuándo es indispensable la hospitalización y proporcionar atención médica urgente.

¿Quiénes tienen mayor riesgo de desarrollar dengue grave?

No todas las personas que contraen dengue presentan complicaciones. En la mayoría de los casos, la enfermedad evoluciona de forma leve y se resuelve en pocos días. Sin embargo, en algunas personas puede progresar a formas graves —antes conocidas como dengue hemorrágico— que requieren atención médica inmediata.



Figura 3. Signos y síntomas de alarma del dengue: fase crítica. La mayoría de los casos de dengue evolucionan favorablemente, pero existen signos que indican riesgo de complicaciones (sangrado, dolor abdominal, vómitos, cansancio, somnolencia e irritabilidad) y éstos suelen aparecer cuando la fiebre disminuye, no cuando está más alta. Por ello es fundamental la vigilancia durante esta etapa.

El riesgo de desarrollar dengue grave depende de una combinación de factores relacionados con el sistema inmunológico, la edad y el estado de salud (Figura 4):

1. Edad. Algunos grupos de edad son especialmente vulnerables: a) adultos mayores, especialmente

después de los 60 años, y b) niños pequeños, particularmente menores de cinco años. En estos grupos existe mayor riesgo de alteraciones en los vasos sanguíneos, pérdida de líquidos y **choque hipovolémico**.

2. Re infecciones. Haber padecido dengue con anterioridad es uno de los principales factores de riesgo.

Choque hipovolémico

Condición grave en la que ocurre una disminución crítica del volumen de sangre circulante en el cuerpo. En el dengue, puede ocurrir por fuga de líquidos desde los vasos sanguíneos, lo que reduce la presión arterial y compromete la llegada de sangre a órganos vitales.

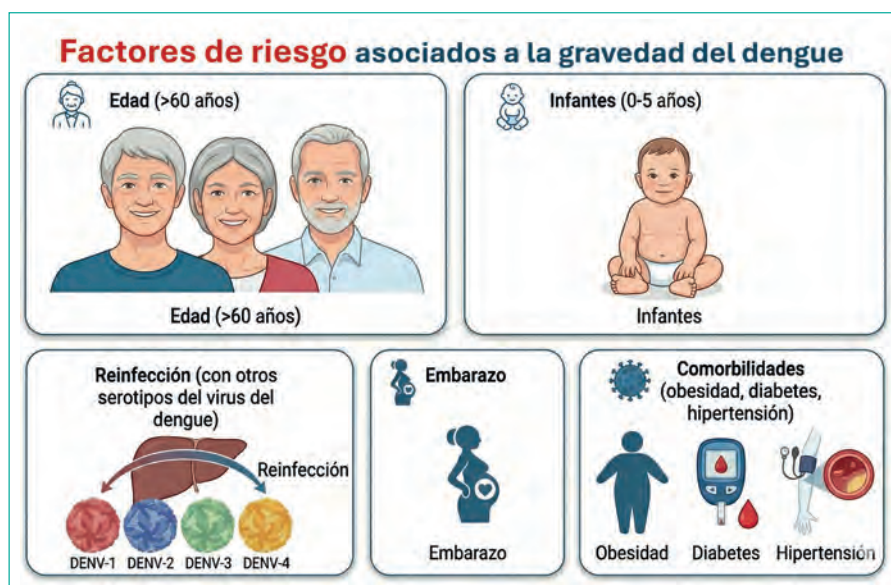


Figura 4. Factores de riesgo asociados a la gravedad del dengue.

Enfermedad de notificación obligatoria
Aquella que, por ley, debe reportarse a las autoridades de salud cuando se detecta un caso. Esto permite vigilar su comportamiento, detectar brotes y aplicar medidas de control.

Existen cuatro tipos distintos del virus, los serotipos DENV-1 a DENV-4. Cuando una persona se infecta por segunda vez con un serotipo diferente al de la primera infección, la respuesta inmunológica puede intensificarse de manera excesiva, aumentando la probabilidad de complicaciones graves.

- 3. El embarazo también incrementa el riesgo, ya que el dengue puede afectar tanto a la madre como al bebé, aumentando la probabilidad de parto prematuro o bajo peso al nacer.
- 4. Comorbilidades. Las personas con enfermedades crónicas tienen mayor probabilidad de desarrollar dengue grave, ya que estas condiciones pueden alterar la respuesta inmunológica o dificultar el equilibrio de líquidos en el organismo. Entre las más asociadas se encuentran: diabetes mellitus, hipertensión arterial y enfermedades cardiovasculares, enfermedad renal crónica y obesidad.

El dengue en México: una enfermedad que sigue ciclos

En México el dengue representa un problema permanente de salud pública, aunque su comportamiento es cíclico y oscilante, caracterizado por fluctuaciones tanto estacionales (dentro de un año) como interanuales (varios años). En el hemisferio sur, la mayoría de los casos de dengue ocurren en la primera mitad del año, mientras que en el hemisferio norte ocurren en la segunda mitad. Esto coincide con el verano, donde las temperaturas más cálidas y lluvio-

sas favorecen la reproducción del mosquito. El dengue también presenta brotes o epidemias cada 2 a 5 años, conocidos como oscilaciones multianuales. En lugares como México se ha identificado que estos ciclos varían entre 3 y 5 años.

Cabe destacar que el dengue es una **enfermedad de notificación obligatoria**. En México, la Secretaría de Salud realiza la vigilancia epidemiológica mediante el registro de los casos diagnosticados clínicamente (casos probables) y aquellos confirmados mediante pruebas de laboratorio.

Año con año, el país reporta un número elevado de casos y un comportamiento oscilante característico, con aumentos periódicos en el número de casos (**Figura 5**). Se estima que cerca del 70 % del territorio nacional presenta condiciones ambientales favorables para el desarrollo del mosquito transmisor, por lo que 30 de los 32 estados del país reportan casos de dengue.

En los últimos años, la mayor incidencia se ha concentrado en el sureste, la costa del Pacífico y la región centro-sur de México. Entre los estados con mayor número de casos se encuentran Veracruz, Jalisco, Guerrero, Quintana Roo, Yucatán, Tabasco y Morelos.

El dengue afecta a personas de todas las edades. En la **Figura 6** se muestra cómo se distribuyen los porcentajes de casos de dengue según la edad y la gravedad, incluyendo las defunciones asociadas a la enfermedad. Aunque estas proporciones pueden variar entre años y regiones, los datos del periodo 2010-2020 revelan que los niños y adolescentes concentran una parte importante de los casos sintomáticos y, de manera preocupante, la gravedad de la enfermedad ha aumentado en menores de 20 años.

Si bien la mayor proporción de muertes ocurre en las personas mayores de 60 años, en los últimos años también se ha registrado un incremento en las defunciones infantiles, lo que subraya la importancia de la prevención y la atención médica oportuna en todos los grupos de edad.

Conclusión

El dengue es una enfermedad viral que puede presentarse con síntomas leves o evolucionar a formas



Figura 5. Casos de dengue en México del año 2010 al 2025. Se muestran los casos probables y confirmados por laboratorio y los picos epidémicos en el 2012-2013, 2015, 2019 y 2023-2024.

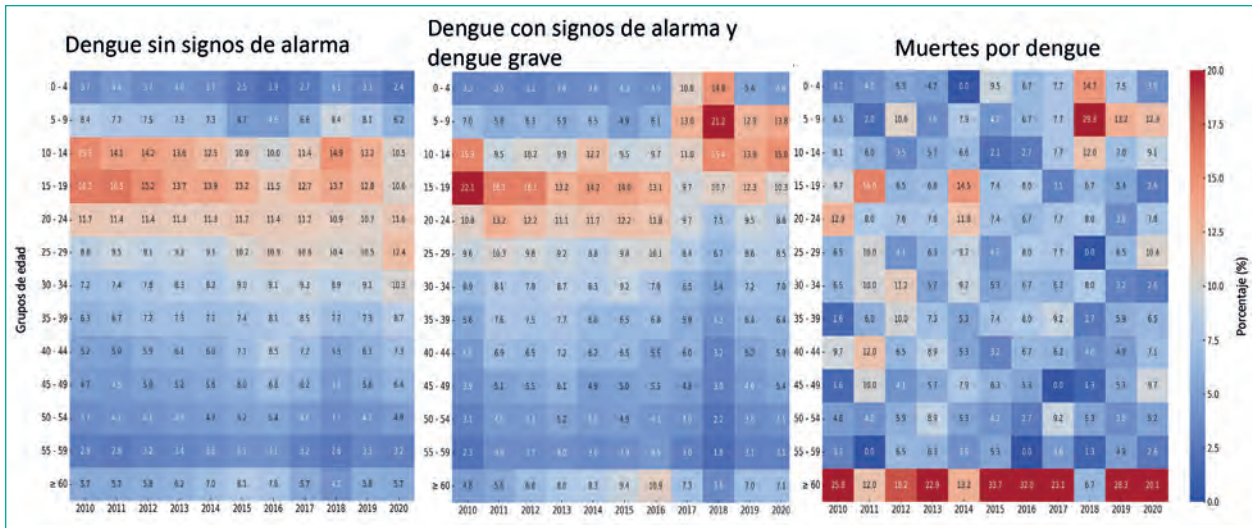


Figura 6. Porcentaje de casos de dengue según gravedad y de muertes por grupos de edad en el periodo del 2010 al 2020. El eje de las ordenadas (Y) corresponde a grupos de edad. Los números dentro del cuadro indican el porcentaje de casos en el grupo de edad y por año, y suman el 100 %. El color rojo indica mayor porcentaje y el color azul, menor porcentaje en el grupo de edad.

graves. Afecta a personas de todas las edades y en México ha cobrado importancia tanto por la cantidad de casos como por su potencial de complicaciones. Aprender a reconocer los síntomas, conocer las categorías de la enfermedad y atenderse oportunamente son pasos clave para enfrentar el dengue.

Édgar Quezada Ruiz

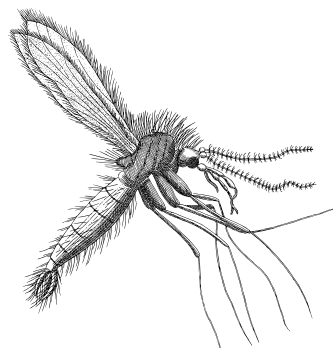
Centro de Investigación Sobre Enfermedades Infecciosas,
Instituto Nacional de Salud Pública, Cuernavaca, Morelos.
MGS_edgar_MGS@hotmail.com

Victoria Pando-Robles

Centro de Investigación Sobre Enfermedades Infecciosas,
Instituto Nacional de Salud Pública, Cuernavaca, Morelos.
victoria.pando@insp.mx

Referencias específicas

- Dirección General de Epidemiología (2025), "Panorama epidemiológico de dengue 2025", Secretaría de Salud [en línea]. Disponible en: <<https://www.gob.mx/salud/documentos/panorama-epidemiologico-de-dengue-2025>>, consultado el 21 de abril de 2026.
- Organización Mundial de la Salud (2025), *Dengue* [en línea]. Disponible en: <<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/dengue-and-severe-dengue>>, consultado el 21 de abril de 2026.
- Organización Panamericana de la Salud (s. f.), *Dengue* [en línea]. Disponible en: <<https://www.paho.org/es/temas/dengue>>, consultado el 21 de abril de 2026.
- Pando-Robles, V., J. Álvarez-Obregón, G. Díaz del Castillo-Flores, J. F. González-Roldán, E. S. Raga-Sarabia *et al.* (2025), "Epidemiological and Economic Burden of Dengue in Mexico: Data Analysis from 2010 to 2020", *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 113(6):1363-1374. Disponible en: <<https://doi.org/10.4269/ajtmh.24-0777>>.



Guillermo Miguel Ruiz-Palacios y Santos y José Ramos Castañeda

La transmisión del dengue

Resumen

Conocer la forma de transmisión del dengue permite comprender su comportamiento epidemiológico, su impacto en la sustentabilidad de las acciones de control del vector, definir estrategias de vacunación, así como discernir el impacto del calentamiento global en el desarrollo futuro de las epidemias de dengue. En este artículo se abordan estos temas de manera general, con énfasis en la información obtenida en México.

Abstract

Understanding the form of dengue transmission allows us to comprehend its epidemiological behavior, its impact on the sustainability of vector control measures, to define vaccination strategies, and to discern the effects of global warming on the future development of dengue epidemics. In this article these issues are addressed in general terms, with an emphasis on information obtained in Mexico.

Conocer la forma de transmisión de una enfermedad infecciosa (EI) es crucial para el diseño de estrategias de salud pública efectivas. En 1854, John Snow estudió y determinó cuál era el principal foco de infección del brote de cólera que en ese momento afectaba a Londres, sentando las bases para el estudio sistemático de la transmisión de una EI. Esas observaciones pusieron énfasis en lo que ahora llamamos *medidas no terapéuticas* del control de la transmisión de una enfermedad, las cuales incluyen aspectos de gestión municipal, gestión del agua y residuos, medidas sanitarias comunitarias y de higiene personal. La mayoría de las infecciones que afectan a los humanos se dan por una transmisión de alguno de estos tres tipos:

1. Directa, cuando sucede por contacto de un ser humano a otro, a través de microgotas de Flügge –que son pequeñas gotas de saliva o moco que se expulsan



Fómites

Objeto inerte, como jeringa o teléfono celular, contaminado con virus y otros microorganismos patógenos capaces de transmitir una infección.

de forma inadvertida por la boca o la nariz al hablar, estornudar, toser o incluso al espirar—, o por contacto con tierra o vegetación contaminadas. Una gota microscópica puede transportar decenas de agentes patógenos; en particular, virus y bacterias.

2. Indirecta, cuando se da a través de partículas suspendidas en el aire o a través de un vehículo como el agua, los alimentos, productos de la sangre, **fómites**.
3. Por vectores como mosquitos, moscas o garrapatas.

Vectores

Organismos, usualmente insectos, que transmiten un agente infeccioso entre animales y humanos, o entre humanos.

Las enfermedades transmitidas por mosquitos, como el dengue, presentan un escenario de transmisión más complejo al requerir de un **vector** intermediario. Los patrones de contagio varían y resultan heterogéneos, dependiendo de la relación del mosquito vector con su entorno y con las personas. Hasta la década pasada, el modelo de transmisión de infecciones transmitidas por insectos era el desarrollado por Ronald Ross y George MacDonald entre 1930 y 1950 (**Figura 1A**). El modelo Ross-MacDonald establece que el evento principal en la transmisión de la malaria (también conocida como paludismo), o del dengue, es cuando el mosquito vector infectado pica a una persona susceptible. El único factor determinante de la persona que interviene en la transmisión es qué tan rápido desaparece el agente infeccioso de su organismo, así que el peso de la transmisión se centra en el mosquito. No es de sorprender, por tanto, que todas las medidas de control de la transmisión de las EI transmitidas por mosquitos se basen en el control de éstos.

Actualmente, el modelo de Ross-MacDonald ha sido modificado considerando los hallazgos recientes del estudio de las variables que determinan la dinámica de la transmisión (**Figura 1B**): la picadura del mosquito infectado y los diferentes **serotipos** del virus, las variables relacionadas con la escala de transmisión (nacional, estatal, municipal, local, sublocal, etc.), la estructura espacial (qué tan diferente es la transmisión a diferentes escalas, los efectos de la conexión entre las diferentes escalas y dentro de una escala, etc.) y la dinámica espacial (la dispersión de los mosquitos, el movimiento de los humanos, etc.).

Serotipos

Tipos de virus que se clasifican según sus antígenos de superficie y se identifican mediante sueros específicos.

En esta versión actualizada, son más los factores del ser humano considerados en la transmisión (factores como la inmunidad contra el agente causal, el comportamiento de los infectados, la nutrición, etc.); así como, contextualmente, el efecto del cambio climático en la dispersión del vector y en la frecuencia de los brotes inducidos por los cambios en el clima.

En vista de lo anterior, la Organización Mundial de la Salud ha propuesto un enfoque integral para el control del dengue y otras enfermedades transmitidas por vectores que no se limita al control de éstos, sino que incluye estrategias de vigilancia epidemiológica, el desarrollo e implementación de tratamientos farmacológicos (antivirales y vacunas) y la gestión del medio ambiente y la participación comunitaria.

La transmisión del dengue

El dengue es causado por un virus, el DENV, que pertenece al género Orthoflavivirus de la familia Flaviviridae. Se conocen cuatro especies que, para efectos prácticos, llamaremos serotipos y se denominan DENV-1 a DENV-4. Todos comparten manifestaciones clínicas, aunque existen diferencias importantes entre ellos, específicamente en cuanto a la gravedad de los casos; por ejemplo, DENV-3 y DENV-2 se asocian con cuadros de mayor gravedad que DENV-1 y DENV-4; sin embargo, todos pueden causar la muerte, especialmente en adultos mayores y en niños menores de 10 años.

Se estima que, luego de una primera infección por cualquiera de los cuatro serotipos del DENV, la persona queda inmune de por vida para el serotipo que la infectó y por un periodo corto, de nueve meses a un año, está protegida contra todos los demás serotipos. Se ha demostrado que esta característica explica el patrón de transmisión del dengue, que en términos llanos consiste en años con muchos casos, separados por años en que hay pocos casos. En lugares donde se ha establecido el dengue, los picos de transmisión están separados más o menos por tres años, y cada pico coincide con la circulación predominante de un nuevo serotipo de DENV.

Para medir la transmisión, se desarrollan modelos matemáticos a partir de datos epidemiológicos, como

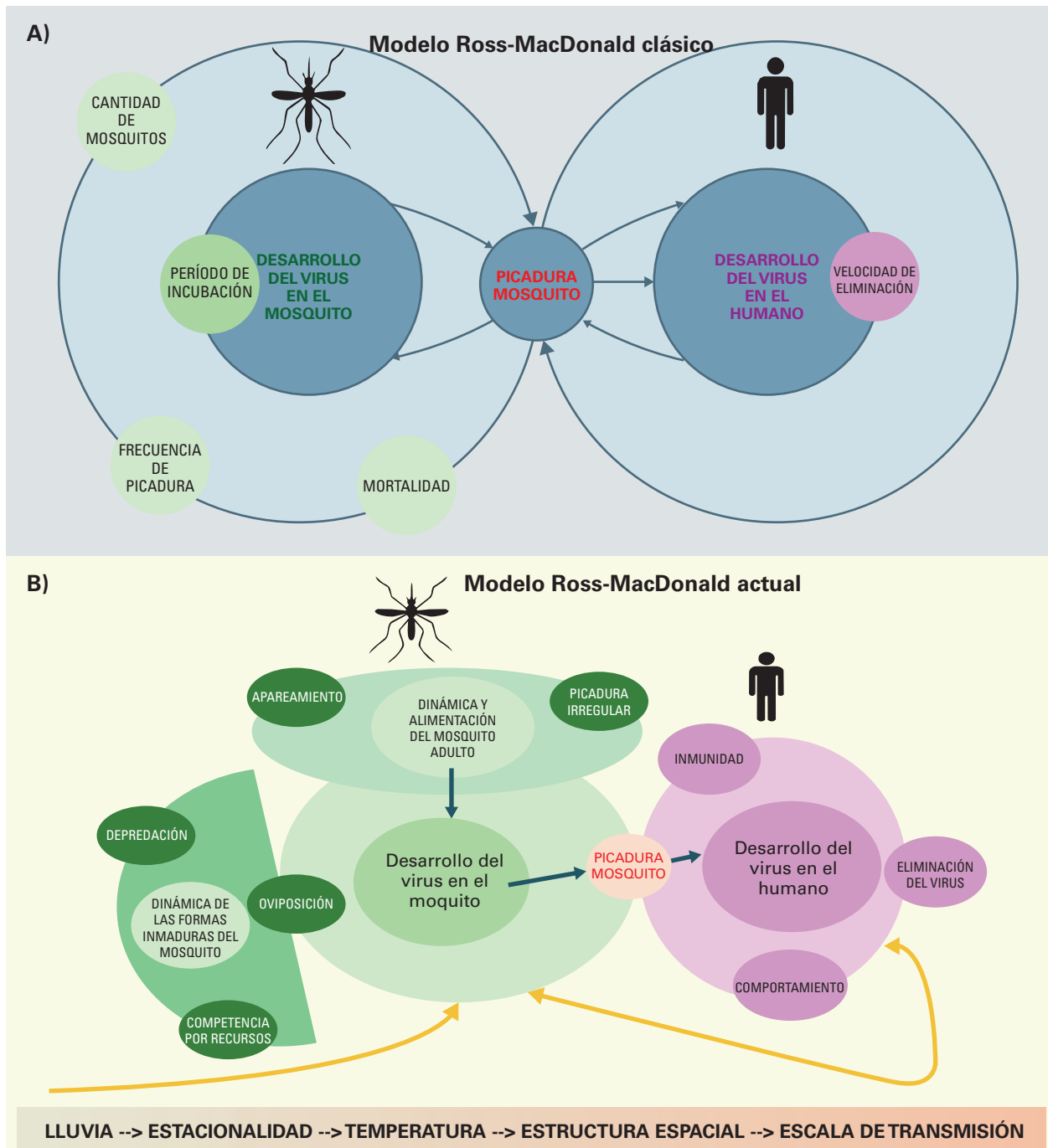


Figura 1. La transmisión de una infección transmitida por mosquitos (ETV). A) El modelo clásico de transmisión de ETV consideraba predominantemente los procesos que ocurrían en el mosquito. B) El modelo actual considera diferentes variables que ocurren en el mosquito y sus fases inmaduras, así como variables de la persona infectada que modifican la transmisión y las diferentes condiciones climáticas, de dimensión y de estructura espacial.

el número de casos nuevos registrados o la frecuencia de detección de anticuerpos contra el agente infeccioso en la población estudiada. El modelo más sencillo se conoce como SIR, pues analiza la dinámica de una población completamente susceptible (s) en

función de cuántas personas se infectan (i) y cuántas se recuperan (r). Mediante este modelo se puede determinar la frecuencia con la que una persona susceptible, en una población determinada, adquiere una infección en un tiempo determinado (Figura 2).

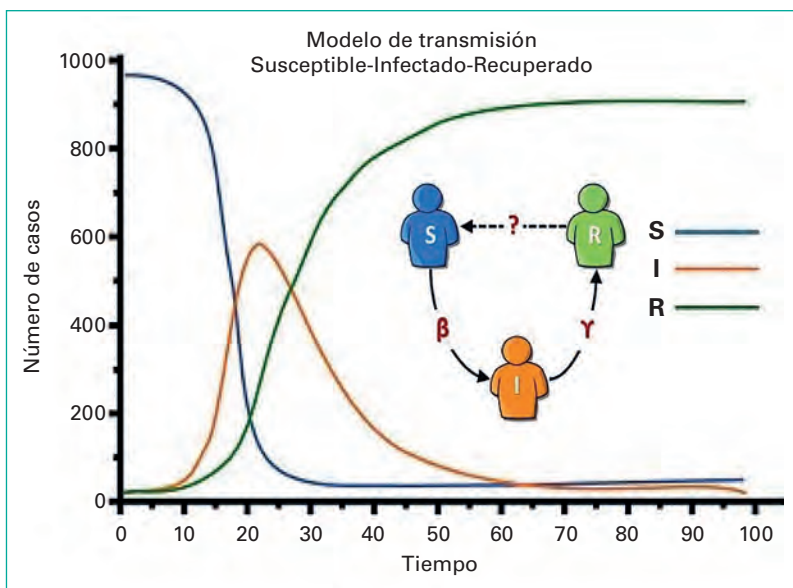


Figura 2. La transmisión de una ETV se puede caracterizar y medir mediante un modelo matemático que se conoce como modelo SIR.

A la probabilidad de que una persona se infecte se le denomina fuerza de infección (FoI) y al número de casos que genera una persona infectada se le conoce como número reproductivo básico (R_0). Aunque estos parámetros en conjunto describen la transmisión de una EI, su interpretación es muy distinta: la FoI es una medida de la historia de la infección en la población, mientras que el R_0 es la medida de la magnitud de la dispersión. Esto tiene consecuencias en el diseño de intervenciones para interrumpir la transmisión; por ejemplo, determinarla en las localidades del país permite racionalizar los programas de vacunación al priorizar localidades donde la probabilidad de infectarse de una persona sea mayor. Por otro lado, el R_0 se utiliza con frecuencia para determinar qué cantidad de población debe ser vacunada para lograr la interrupción (**Figura 3**).

Un aspecto importante para ponderar estos parámetros es que los datos epidemiológicos con los que se mide la transmisión de la EI no reflejan la realidad de la transmisión, ya que, para el caso del dengue, no todas las infecciones generan síntomas; de hecho, se estima que casi el 85 % de las infecciones por dengue pasan inadvertidas para el sistema de vigilancia epidemiológica. Aproximadamente el 50 % son asintomáticas, pero el resto son infecciones con signos o

síntomas que, a juicio de los pacientes, no merecen una visita a los servicios médicos o a alguna atención privada (incluyendo los consultorios asociados a farmacias, que representan el 25 % del total), pues ésta no forma parte de la red de vigilancia epidemiológica en México.

Considerando lo anterior y dado que México tiene una geografía particular, resulta obvio que la distribución de la FoI por DENV en el país es heterogénea. Los estados con FoI menores que 0.1 (probabilidad mayor que 10 % de infectarse por DENV) son del sur-sureste del país; otro grupo lo conforman los estados con FoI menores que 0.1 y hasta 0.05, en su mayoría del centro y noroeste del país; y los estados con FoI menores que 0.05 están distribuidos en el centro y norte del país. A nivel de localidad, aquellas con mayores FoI no necesariamente se encuentran en los estados con mayor FoI.

Esta heterogeneidad distorsiona las magnitudes de la FoI, pues los cálculos se basan en que la pro-



Figura 3. La transmisión de una ETV se puede medir mediante dos parámetros: 1) la fuerza de infección, que nos dice cuál es la probabilidad de infectarse en una localidad independientemente de si hay un pico epidémico, y 2) el R_0 , parámetro que establece qué tan intensa es la transmisión durante el pico epidémico.

babilidad de infectarse es igual en toda la población. En el caso del dengue, esto no es posible, ya que influyen factores socioeconómicos, como la urbanización; demográficos, como la densidad de población, y climáticos, como la temperatura y las lluvias. Como consecuencia, durante un pico de transmisión, los casos se acumulan en áreas donde las condiciones interactúan de manera óptima para sostener una cadena de transmisión; a estas áreas las llamamos “puntos calientes” (*hot spots*, en inglés) (Figura 4). Estas áreas deberían ser el blanco de las medidas de control, pero no hay forma de pronosticar dónde aparecerán; vaya, conocemos las variables principales, pero no sabemos cómo interactúan entre sí para que se generen las condiciones y se forme un punto caliente.

El cambio climático y la transmisión del dengue

Las EI transmitidas por insectos, entre ellos el dengue, son muy susceptibles a los cambios climáticos, pues la mayoría de los insectos dependen de con-

diciones particulares de humedad y temperatura para prosperar; como consecuencia, el calentamiento global tiene impacto en la reproducción de los insectos y su dispersión en el planeta. Por ejemplo, se considera que por cada grado de aumento en la temperatura media de una región donde existe transmisión del dengue, se incrementa la cantidad de casos hasta en un 10%; no obstante, temperaturas medias extremas sostenidas mayores que 36°C pueden disminuir la transmisión o inclusive interrumpirla por completo. No sólo la temperatura media es importante, la humedad relativa en la región debe ser alta, de entre 75 y 90%; sin embargo, por los hábitos del principal mosquito transmisor de la enfermedad, humedades relativas de hasta 50 % permiten la transmisión del dengue cuando el vector encuentra recipientes que contengan agua dentro de las casas y sus alrededores.

La relación entre humedad y temperatura media que permite la transmisión del dengue es compleja y se ve influida por la ecología, la urbanización y la movilidad de las poblaciones, por mencionar algunas variables involucradas; tal vez ésta sea la razón por la cual el norte de México tiene FoI menores que el sur-sureste, pues aunque la temperatura media es óptima para la transmisión, la humedad es mucho más baja que en el sur-sureste.

Podemos separar los efectos del cambio climático en dos aspectos: uno tiene que ver con la dispersión del dengue y otro, con los cambios específicos en los patrones locales del clima. Se pensaba que el dengue sólo se transmitía en localidades por debajo de los 1 500 metros sobre el nivel del mar y entre los 35°N y 35°S de latitud. El calentamiento global ha cambiado esta distribución, pues al aumentar la temperatura media, se propicia la transmisión del dengue debida al mosquito *Aedes aegypti*, pero además porque otro mosquito, el *Aedes albopictus* —que no es tan eficaz en transmitir el dengue—, puede sostener la transmisión en condiciones donde el *Aedes aegypti* no es eficiente, como en los casos de los brotes en Roma, París o Tokio. En México, el Bajío, por su altura y condiciones climáticas, no era una región endémica de dengue; sin embargo, los brotes recientes de dengue en León, Querétaro capital y

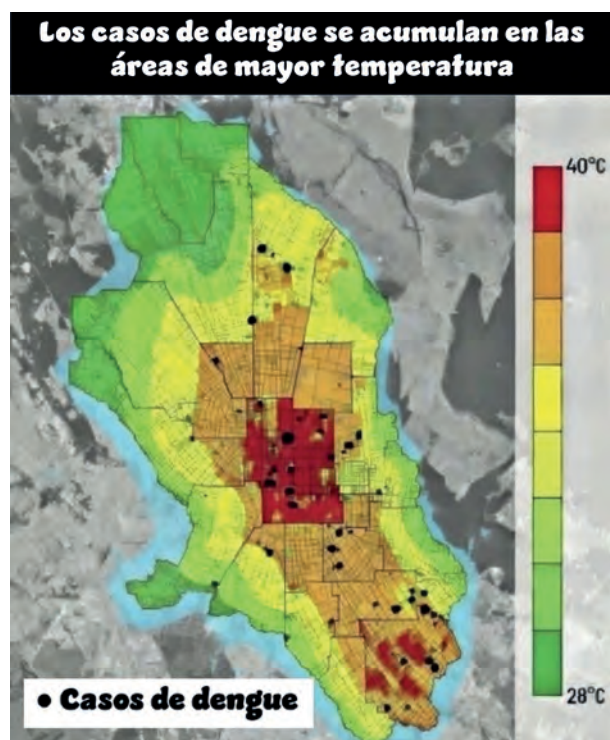


Figura 4. El clima afecta la distribución de casos de cualquier ETV no sólo a nivel local, pues existen zonas en donde el clima es óptimo para el desarrollo del mosquito. En Cuernavaca, Morelos, los casos de dengue (puntos negros: entre más grandes mayor es el número de casos) se acumulan donde las temperaturas del área son más altas (áreas de color).

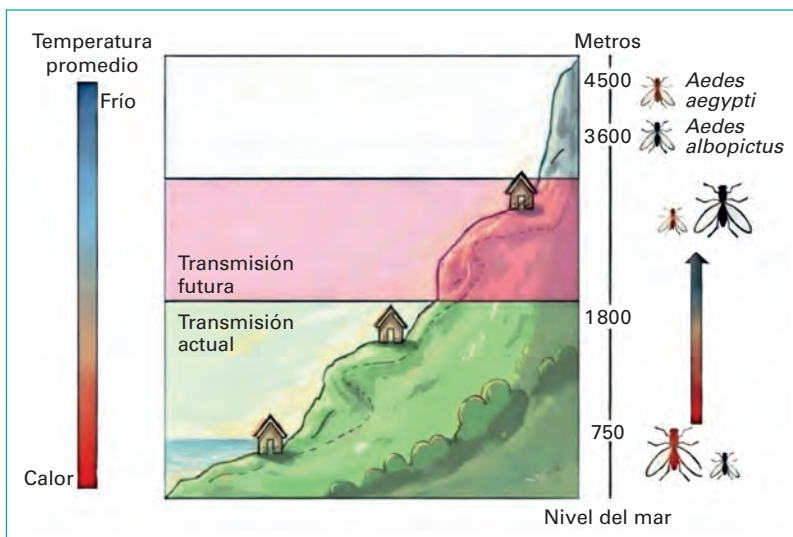


Figura 5. Actualmente, la transmisión del dengue se está desplazando de zonas tropicales/subtropicales a zonas templadas de temperatura media. Apparently, este desplazamiento va acompañado de un remplazo de la especie del mosquito transmisor, pues en climas tropicales el vector principal es *A. aegypti* y en climas templados el vector principal es *A. albopictus*.

Aguascalientes capital son ejemplos de lo que puede ocurrir en el futuro.

Finalmente, con las variaciones del clima derivadas del cambio climático, como el incremento de la humedad relativa anual, el aumento de la frecuencia de eventos climáticos extremos y, en general, las variaciones en la temporalidad de las estaciones, se generan condiciones que incrementan la transmisión de esta EI (**Figura 5**).

Transmisión del dengue e intervenciones de salud pública

El conocimiento y el mejor entendimiento de la dinámica multifactorial de la infección por el virus del dengue han sido fundamentales para el desarrollo de métodos de control de la transmisión y disminución de la carga de enfermedad.

Control vectorial. Existen a la fecha tres tipos de control vectorial: químico, biológico y ambiental. Los métodos químicos incluyen el uso de soluciones, mezclas, aerosoles o sustancias repelentes, así como el uso de piretroides para la fumigación al aire libre, insecticidas para interiores y exteriores en *spray*, mosquiteros o larvicidas. Los métodos biológicos incluyen peces larvívoros, ciclopoides y *Bacillus*

thuringiensis israelensis. Otros métodos con gran potencial incluyen vectores con alteraciones genéticas que inhiben la transmisión del virus del dengue. En este grupo se incluyen técnicas de esterilización del mosquito, mosquitos genéticamente modificados y la introducción de la bacteria *Wolbachia* en los mosquitos machos, reduciendo la población de vectores por incompatibilidad citoplasmática, lo que resulta en la muerte de los embriones y también por un efecto directo en la replicación viral. Recientes estudios en México, Brasil y Singapur han mostrado una eficacia por arriba del 80 por ciento.

En principio, en México, las medidas de control vectorial se ponen en marcha una vez confirmado un caso de dengue. No obstante, administrativamente, esto no sucede porque los recursos para operar el programa de control no están disponibles hasta que se inicia la “temporada de dengue”, que coincide con la temporada de lluvias; para entonces, sabemos que las cadenas de transmisión ya se establecieron y el impacto del programa de control vectorial sólo llega a disminuir en menos de 25 % la aparición de nuevos casos, lo cual es insuficiente para interrumpir la transmisión. Estimamos que por cada mes que se adelante el programa de control vectorial se suma un 10 % de reducción en los casos.

Supongamos que las limitaciones administrativas no pueden cambiarse por cuestiones de la administración de los recursos públicos. Lo que puede hacerse es reforzar el sistema de vigilancia epidemiológica, de tal manera que se puedan priorizar áreas de atención que, aunque no extingan la transmisión, al menos reduzcan el costo humano en hospitalizaciones, muertes y carga de la enfermedad en el sector público, que en 2011 fue de aproximadamente 1 400 millones de pesos.

La Secretaría de Salud, a través del Centro Nacional de Prevención y Control de Enfermedades, desarrolló una plataforma informática que se alimenta de la información del programa de control del dengue, en la que actualmente se registran casos, cantidad de huevos y algunos índices de la cantidad de mosquitos. Así que, en el futuro, con trabajo multidisciplinario, quizá se puedan integrar datos de variables climáticas, demográficas y socioeconómicas

en un entorno de análisis mediante inteligencia artificial para elaborar mapas de riesgo en tiempo real que puedan alcanzar dos objetivos: el inicio temprano de las actividades de control y la optimización de los recursos para el control del mosquito.

Vacunación. Actualmente, se cuenta con dos vacunas con registro sanitario en México: Dengvaxia, de Sanofi-Pasteur, y TAK-003 (Qdenga), de Takeda. Pronto se someterá a evaluación una tercera vacuna, TVE003, desarrollada por el consorcio NIH-Bu-tantan. Estas vacunas tienen una eficacia contra la infección de entre el 60 y el 70 %, y contra la enfermedad grave de más del 90 %. Independientemente de sus características particulares de dosificación, Dengvaxia y Qdenga deben aplicarse en poblaciones endémicas. Una población endémica es aquella en la que se presentan casos en todo momento, no importa si son pocos o muchos; este concepto es difícil de aplicar en el caso del dengue, porque no todas las infecciones son captadas por el sistema de vigilancia, a lo que a veces se le llama *transmisión silenciosa*; pero además, porque mientras se establece el ciclo recurrente de picos epidémicos, aproximadamente cada tres años, una población puede experimentar una “transmisión silenciosa” hasta que un nuevo serotipo del virus comience a circular. Puesto que México fue el primer país del mundo que otorgó licencia sanitaria a una vacuna contra el dengue (Dengvaxia), el grupo de expertos en dengue del país desarrolló un concepto de población endémica basado en indicadores epidemiológicos: que el 50 % de la población tuviera anticuerpos contra el DENV, que la incidencia, mortalidad, circulación de serotipos, sean sostenidos, etc.; sin embargo, aunque rigurosa, en la práctica esta definición tenía problemas para aplicarse, en particular porque no había datos de seroprevalencia para todas las localidades, ni tampoco están completos los registros epidemiológicos. En un esfuerzo por suplir esta deficiencia, se ha intentado asociar la FoI con factores ambientales, socioeconómicos y demográficos, de modo que se pueda estimar este parámetro sin recurrir a encuestas complejas

y costosas de llevar a cabo. Así pues, una localidad endémica se puede definir como aquella que tiene una altitud de 200 m sobre el nivel del mar; temperatura media anual mayor que 23 °C; lluvia promedio anual mayor que 600 mm, y frecuencia de agua municipal entubada menor que 75 % de las casas para FoI mayores que 5 por ciento.

■ **Conclusión**

■ El dengue es un problema de salud pública en el mundo. En México la transmisión no sólo se ha incrementado en magnitud, sino que también ha crecido el número de casos en áreas donde la transmisión era marginal o no existía. Por eso el conocimiento de los procesos y variables que la generan es una prioridad para diseñar y mejorar las intervenciones de salud pública que permitan interrumpir la transmisión.

Guillermo Miguel Ruiz-Palacios y Santos

Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición “Salvador Zubirán”.

gmrps@unam.mx

José Ramos Castañeda

Instituto Nacional de Salud Pública.

jramos@insp.mx

Lecturas recomendadas

Johnson, Steven y Cristina Mbarichi Lumu (2020), *El mapa fantasma: la epidemia que cambió la ciencia, las ciudades y el mundo moderno*, Madrid, Capitán Swing Libros.

Kennedy, Jonathan y Francisco J. Ramos Mena (2025), *Patogénesis: una historia del mundo en ocho plagas*, Barcelona, Penguin Random House.

Kucharski, Adam (2020), *Las reglas del contagio*, trad. de Francisco Herreros, s. l., Capitán Swing Libros.

Molina del Villar, América (2025), *Historia mínima de las epidemias en México*, México, El Colegio de México.

Sánchez Yáñez, Juan Manuel (2011), *Las enfermedades infecciosas en la historia humana*, s. l., Libros en Red.

Rosa María del Ángel, Magda Lizbeth Benítez Vega y Ricardo Jiménez Camacho

El dengue bajo la lupa: cómo se replica y cómo detenerlo

Resumen

El virus del dengue provoca millones de infecciones cada año. Este artículo explica las estrategias usadas para buscar antivirales y cuáles son los principales desafíos científicos y médicos que han dificultado el desarrollo de tratamientos eficaces contra esta enfermedad.

Abstract

The dengue virus causes millions of infections each year. This article explains the strategies used to search for antiviral drugs, and the main scientific and medical challenges that have hindered the development of effective treatments for this disease.

Imagina que algo tan pequeño como un mosquito puede cambiar por completo el rumbo de tu vida. En muchas regiones del mundo, la picadura de un mosquito basta para transmitir el virus del dengue (DENV, por sus siglas en inglés), causante de una enfermedad que cada año afecta a millones de personas.

Para algunos, el dengue se manifiesta como una fiebre intensa acompañada de dolor de cabeza, dolor muscular y cansancio extremo; para otros, la infección puede evolucionar hacia formas graves que requieren atención médica urgente y pueden incluso poner en riesgo la vida.

Dentro de la célula: así se multiplica el virus del dengue

Para entender cómo el virus provoca daño en el organismo, es necesario observar qué sucede dentro de nuestras células. Una vez que entra en ellas, el virus utiliza los recursos celulares para multiplicarse, casi como un intruso que se apropia de una fábrica ajena para producir copias de sí mismo.

Este proceso no ocurre al azar. Sigue una serie de pasos bien organizados que se conoce como ciclo replicativo y que abarca desde la entrada del virus en la célula



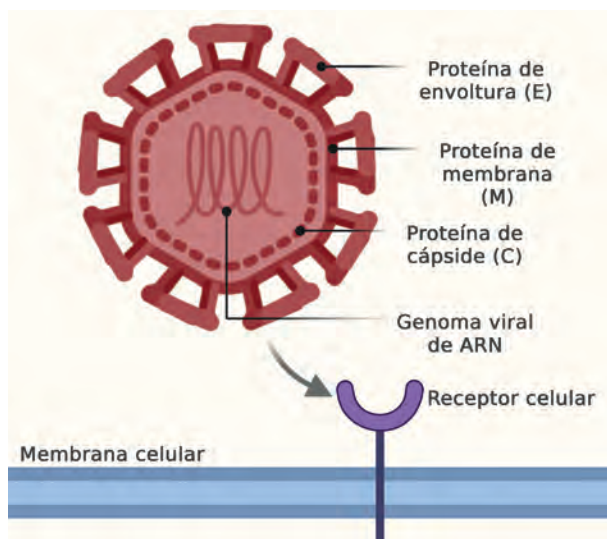


Figura 1. Estructura del DENV. La partícula viral consta de tres proteínas estructurales. La proteína E interactúa con los receptores de la célula, mientras que la proteína M y la proteína de la cápside protegen el ARN viral.

Aparato de Golgi
Órgano celular encargado de modificar, empaquetar y transportar proteínas y lípidos. Desempeña un papel esencial en la maduración y el procesamiento de nuevas partículas virales durante el ciclo del virus del dengue.

hasta la liberación de nuevas partículas capaces de infectar otras células.

Para llevar a cabo este proceso, el DENV posee una cubierta formada por tres proteínas estructurales: la proteína de envoltura (E), la proteína de membrana (M) y la proteína de la cápside (C). Estas proteínas rodean y protegen el genoma viral de ARN, que contiene toda la información necesaria para producir las proteínas estructurales y no estructurales del virus (Figura 1).

Entre estas proteínas, la proteína E desempeña un papel fundamental en la entrada del virus en la célula, ya que le permite unirse a receptores presentes en la membrana celular. Esta interacción desencadena la internalización del virus mediante una vesícula llamada endosoma, como si se abriera una puerta utilizando una llave específica.

Una vez que el virus queda “atrapado” en el endosoma, este compartimento comienza a acidificarse. Esta disminución del pH provoca cambios en la estructura de la proteína E que permiten la fusión entre la membrana del endosoma y la del virus. Como resultado, el genoma viral de ARN se libera al interior de la célula.

A partir de ese momento, el ARN viral es traducido para producir las proteínas estructurales y siete

proteínas no estructurales, conocidas como NS1, NS2A, NS2B, NS3, NS4A, NS4B y NS5. Estas proteínas reorganizan las membranas del retículo endoplasmático y forman estructuras especializadas llamadas complejos de replicación, donde se generan nuevas copias del ARN y de las proteínas virales.

Cuando se han producido suficientes copias del ARN viral y de las proteínas estructurales, comienza el ensamblaje de nuevas partículas virales. Este proceso funciona como una línea de montaje en la que el material genético se empaqueta con proteínas estructurales para formar virus completos, aunque aún inmaduros.

Posteriormente, estas nuevas partículas pasan por un proceso de maduración en el **aparato de Golgi**, donde ocurren cambios en la proteína E que les permiten convertirse en partículas completamente infecciosas.

Finalmente, los nuevos virus son liberados al exterior de la célula, desde donde pueden infectar otras células y repetir el ciclo de infección (Figura 2).

Este proceso explica cómo el virus puede multiplicarse rápidamente en el organismo y alterar distintas funciones celulares, dando lugar a los síntomas característicos del dengue.

Comprender cada una de las etapas del ciclo replicativo no sólo permite entender cómo actúa el virus, sino también identificar posibles estrategias para desarrollar tratamientos antivirales.

Esto es especialmente importante porque, a pesar de su enorme impacto en la salud pública, todavía no existe un tratamiento antiviral específico contra el dengue.

Antivirales contra el dengue: atacar al virus o a la célula

Si el virus necesita completar una serie de pasos para multiplicarse, entonces interrumpir cualquiera de esos pasos podría frenar la infección. Este principio constituye la base del desarrollo de antivirales contra el dengue.

Algunos fármacos buscan bloquear directamente al virus. Éstos se conocen como antivirales de acción directa (DAA, por sus siglas en inglés), y actúan in-

terfiriendo con funciones esenciales de las proteínas virales.

Para este propósito, varias proteínas del virus –como C, E, NS1, NS2B, NS3, NS4A, NS4B y NS5– han sido estudiadas como posibles blancos terapéuticos.

En general, los antivirales dirigidos específicamente contra el virus suelen ser bien tolerados y producir pocos efectos secundarios. Sin embargo, presentan un desafío importante: los virus pueden evolucionar y desarrollar resistencia a estos fármacos.

Por esta razón, en los últimos años ha cobrado fuerza una estrategia diferente: atacar los procesos celulares que el virus utiliza para replicarse.

Este enfoque se conoce como antivirales dirigidos al huésped (HDA). Parte de una idea simple: si el virus depende completamente de la maquinaria de la célula para multiplicarse, entonces modificar esos procesos puede impedir que la infección progrese.

El virus del dengue utiliza numerosos procesos celulares para completar su ciclo replicativo. Algunos antivirales dirigidos al huésped buscan impedir la entrada del virus en la célula o su transporte hacia los sitios donde ocurre la replicación. Otros interfieren con la producción y el transporte de proteínas dentro de la célula, o con los mecanismos que regulan su degradación.

También existen fármacos que afectan recursos celulares esenciales que el virus explota, como el colesterol o las moléculas necesarias para sintetizar ARN viral. De manera similar, algunos antivirales actúan sobre rutas de señalización celular que regulan el metabolismo o sobre los sistemas que controlan el transporte de proteínas entre el núcleo y el citoplasma.

Este conocimiento sobre la interacción entre el virus y la célula ha impulsado el desarrollo de antivirales dirigidos al huésped, cuyo objetivo es modificar el entorno celular de tal manera que el virus ya no pueda replicarse eficientemente.

Además, debido a que muchos virus dependen de procesos celulares similares, este tipo de antivirales tiene el potencial de actuar contra distintos virus y contra los diferentes serotipos del dengue (Figura 3).

Aunque numerosos antivirales han mostrado resultados prometedores en el laboratorio y algunos han

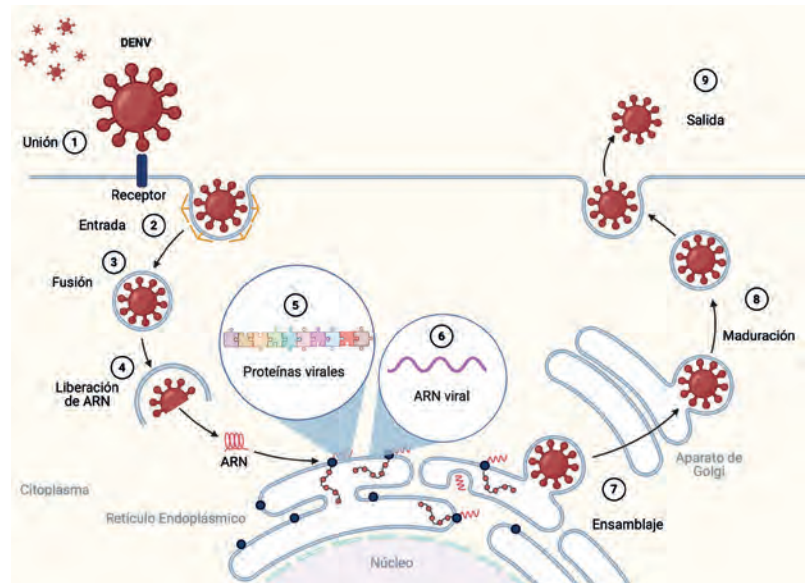


Figura 2. Ciclo replicativo del DENV. La partícula viral comienza a unirse a los receptores de la proteína E (1), lo que desencadena su entrada (2). La partícula viral se mantiene en el endosoma para liberar su genoma en el citoplasma (3 y 4). El ARN se traduce para producir las proteínas virales, tanto estructurales como no estructurales (5). En los complejos de replicación se producen nuevas copias de ARN viral (6). El ARN viral y las proteínas virales estructurales se ensamblan en nuevas partículas virales (7) que viajan al aparato de Golgi, donde maduran (8). Los virus son liberados y pueden infectar nuevas células (9).

logrado reducir la producción de virus en células infectadas, hasta ahora ninguno ha demostrado ser completamente seguro y eficaz en pacientes con dengue.

El gran reto pendiente: desarrollar antivirales contra el dengue

Puede resultar sorprendente que, pese a décadas de investigación, todavía no existan antivirales especí-

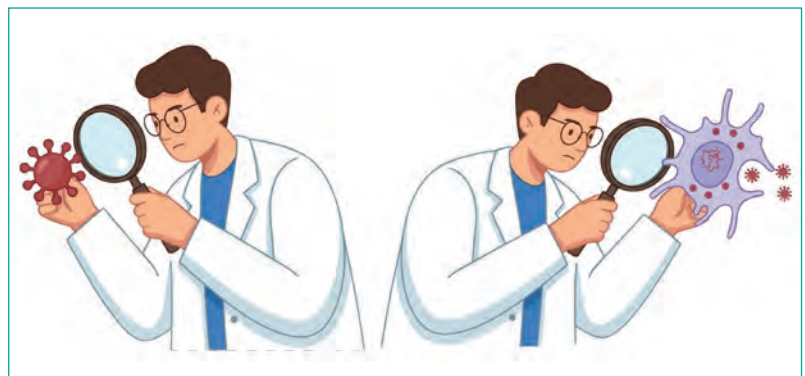


Figura 3. Comparación de dos estrategias para combatir el DENV. Los antivirales de acción directa (DAA) bloquean las funciones de las proteínas virales, mientras que los antivirales dirigidos al huésped (HDA) modifican los procesos celulares que el virus utiliza para completar su ciclo replicativo.

ficos contra el dengue. Sin embargo, esto se debe a una serie de desafíos científicos y médicos.

Uno de los principales es la complejidad del propio virus. El dengue no es un único virus, sino un grupo de cuatro **serotipos** diferentes. Una persona puede infectarse con cualquiera de ellos, por lo que un tratamiento ideal debería ser eficaz contra todos. En la práctica, muchos antivirales funcionan contra un serotipo, pero no contra los demás.

Otro reto importante es la estrecha relación entre el virus y la célula humana. Dado que el DENV depende de múltiples procesos celulares para replicarse, bloquear estos mecanismos también puede afectar funciones normales del organismo y provocar toxicidad.

Además, los antivirales dirigidos específicamente al virus pueden perder eficacia si éste desarrolla mutaciones que lo vuelvan resistente al tratamiento (Figura 4).

A esto se suma la dificultad de los modelos experimentales. Muchos compuestos que parecen prometedores en células cultivadas en el laboratorio no funcionan cuando se prueban en animales o en humanos, donde la infección es mucho más compleja.

La variabilidad de la enfermedad también complica el desarrollo de tratamientos. La mayoría de las personas infectadas presenta síntomas leves o incluso ningún síntoma, mientras que sólo una fracción desarrolla formas graves. Esto dificulta identificar a

los pacientes que más se beneficiarían de un antiviral en los ensayos clínicos.

Por otra parte, el dengue afecta principalmente a países de ingresos bajos y medios, lo que históricamente ha limitado la inversión sostenida en el desarrollo de fármacos.

Ante este panorama, una estrategia que ha ganado interés es el reposicionamiento de fármacos, el cual consiste en evaluar medicamentos ya aprobados para otras enfermedades como posibles antivirales. Como estos compuestos ya han sido probados en humanos, su desarrollo clínico puede ser más rápido y menos costoso.

Aun así, incluso cuando se identifican candidatos prometedores, surgen otros retos relacionados con su distribución en el organismo, su estabilidad, la dosis adecuada y el momento óptimo para administrarlos (Figura 5).

En conjunto, estos desafíos explican por qué el desarrollo de antivirales contra el dengue ha sido un proceso lento y complejo. Muchos expertos consideran que las soluciones futuras probablemente no dependerán de un solo fármaco, sino de combina-

Serotipos ▶ Variantes de un mismo virus que difieren en la estructura de sus antígenos y pueden generar respuestas inmunitarias distintas. El virus del dengue tiene cuatro serotipos: DENV-1, DENV-2, DENV-3 y DENV-4.

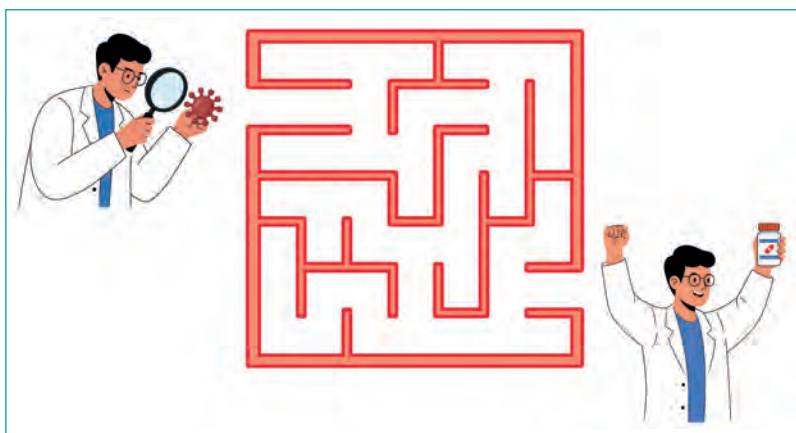


Figura 4. El desarrollo de antivirales contra el dengue enfrenta múltiples obstáculos. La complejidad del ciclo replicativo del virus y su estrecha dependencia de los procesos celulares del huésped hacen que la obtención de tratamientos seguros y eficaces sea un desafío comparable al de encontrar la salida de un laberinto.



Figura 5. Principales retos asociados al desarrollo de antivirales contra el dengue. Factores como la diversidad de serotipos, la seguridad, la farmacocinética, la eficacia y su evaluación en modelos experimentales representan barreras que han dificultado la obtención de tratamientos seguros y efectivos.

ciones de antivirales de acción directa y antivirales dirigidos al huésped, capaces de atacar la infección desde distintos frentes.

A pesar de los numerosos desafíos, el estudio del virus del dengue ha avanzado de manera notable en las últimas décadas. Hoy sabemos con mucho mayor detalle cómo el virus entra en nuestras células, cómo reorganiza su maquinaria para multiplicarse y cuáles son los puntos más vulnerables de su ciclo de replicación. Cada uno de estos descubrimientos representa una pista para diseñar estrategias capaces de detenerlo.

En laboratorios de todo el mundo –incluidos varios en México– investigadores analizan miles de compuestos, estudian nuevas combinaciones de fármacos y exploran formas de bloquear las rutas celulares que el virus necesita para replicarse. Aunque todavía no existe un antiviral específico contra el dengue, el conocimiento acumulado en los últimos años está acercando cada vez más esa posibilidad.

El dengue nos recuerda que, en ocasiones, amenazas enormes pueden venir de organismos diminutos. Pero también demuestra algo igual de importante: que comprender cómo funciona un virus, paso a paso y molécula por molécula, es una de las herramientas más poderosas que tenemos para enfrentarlo. Bajo la lupa de la ciencia, incluso los enemigos más pequeños pueden empezar a perder ventaja.

Rosa María del Ángel

Departamento de Infectómica y Patogénesis Molecular del Cinvestav.

rmangel@cinvestav.mx

Magda Lizbeth Benítez Vega

Departamento de Infectómica y Patogénesis Molecular del Cinvestav.

magda.benitez@cinvestav.mx

Ricardo Jiménez Camacho

Departamento de Infectómica y Patogénesis Molecular del Cinvestav.

ricardo.jimenez@cinvestav.mx

Lecturas recomendadas

Jiang, Y., Y. Wang, Y. Xu, Y. Tian, M. Zhao, C. Shen, Y. Yang y M. Yang (2025), “Antiviral agents for dengue virus”, *Virologica Sinica*, 40(6):865-873. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.virs.2025.11.009>.

Jiménez Camacho, R., C. N. Farfán Morales, J. de J. Bravo Silva, M. L. Benítez Vega, C. D. Cordero Rivera y R. M. del Ángel Núñez de Cáceres (2024), “La lucha continúa: el desafío para el desarrollo de un tratamiento para el dengue”, *Avance y Perspectiva* [en línea]. Disponible en: <https://ayp.cinvestav.mx/la-lucha-continua-el-desafio-para-el-desarrollo-de-un-tratamiento-para-el-dengue/>, consultado el 25 de abril de 2026.

Laredo-Tiscareño, S. V., X. Guo y V. Bocanegra-García (2012), “Virus del dengue: estructura, serotipos y epidemiología molecular”, *CienciaUAT*, 6(3):27-33. Disponible en: <https://revistaciencia.uat.edu.mx/index.php/CienciaUAT/article/view/54/44>, consultado el 25 de abril de 2026.

Rakotoarimanana, A. K., P. Carrière-Richez, V. V. Ramanandraibe, A. Bialecki y C. El Kalamouni (2025), “Antiviral strategies against dengue virus: Recent insights into compounds targeting viral and host factors”, en *Dengue Virus Evolution: From Emergence to a Global Health Crisis*, serie Current Topics in Microbiology and Immunology, vol. 447, pp. 287-335, Springer. Disponible en: https://doi.org/10.1007/82_2025_322.

Rodríguez Chacón, N., R. Saborío Barquero y T. Sevilla Sevilla (2025), “Dengue: una revisión sistémica de la arbovirosis más prevalente en América Latina”, *LATAM: Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 6(4):1815-1823. Disponible en: <https://revistalatam.redilat.org/index.php/lt/article/view/4399/8323>, consultado el 25 de abril de 2026.

Valadez, B. (2025), “¿Una cura contra el dengue? Los primeros pasos están dados”, *Milenio*.

Velandia, Myriam L. y Jaime E. Castellanos (2011), “Virus del dengue: estructura y ciclo viral”, *Infectio*, 15(1):33-43. Disponible en: https://revistainfectio.org/P_OJS/index.php/infectio/article/view/6, consultado el 25 de abril de 2026.

Mauricio Rodríguez Álvarez



Cuatro virus, un mismo dengue: serotipos, respuesta inmune y vacunas

Resumen

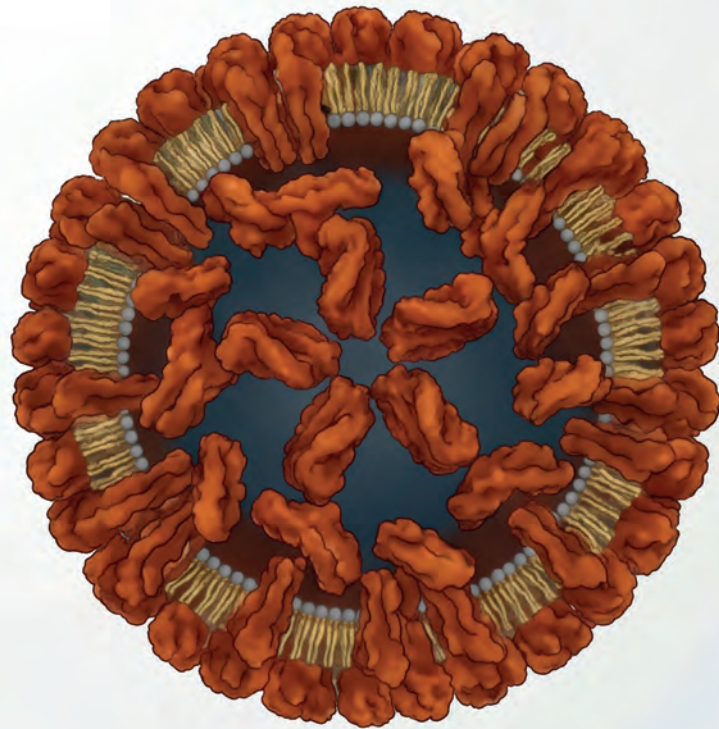
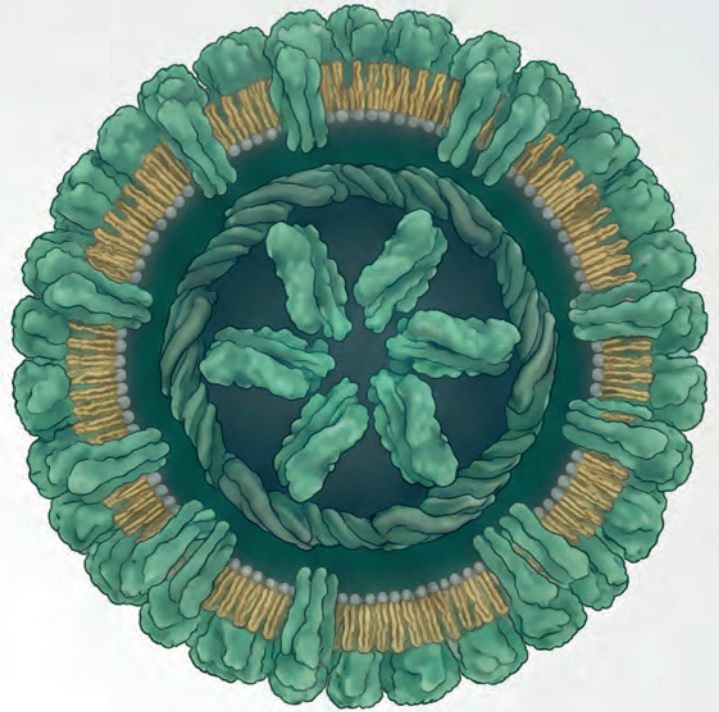
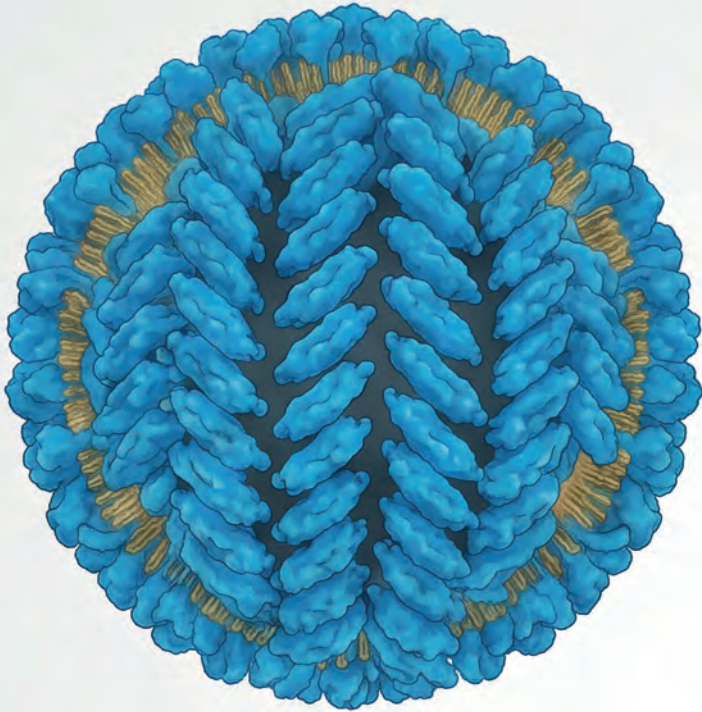
El dengue tiene cuatro tipos virales y la inmunidad es específica. Cada nueva infección por un tipo viral distinto puede aumentar el riesgo de enfermedad grave por amplificación dependiente de anticuerpos (ADE), donde anticuerpos previos facilitan el daño. Este fenómeno ha complicado el desarrollo de vacunas. En este texto se revisan avances recientes y vacunas seguras y eficaces ya incorporadas al control de esta importante enfermedad.

Abstract

Dengue has four viral types, and immunity is specific to each. Each new infection with a different type can increase the risk of severe disease due to antibody-dependent enhancement (ADE), in which preexisting antibodies facilitate damage. This phenomenon has complicated vaccine development. This text reviews recent advances and safe and effective vaccines already incorporated into the control of this important disease.

El virus, el mosquito y la enfermedad

El dengue es una enfermedad viral que se distingue por la presencia de fiebre, dolor intenso de huesos, músculos y articulaciones, que puede complicarse provocando alteraciones en la coagulación de la sangre que ponen en riesgo la vida de las personas que la padecen. En los últimos años, el comportamiento y el impacto de esta enfermedad han cambiado, principalmente como consecuencia de alteraciones del medio ambiente derivadas del cambio climático de origen humano, junto con la forma en que las actividades humanas transforman y ocupan los espacios donde vive el mosquito. Se estima que, en los últimos seis años, la presentación del dengue en México ha sido muy variable —en parte por lo ocurrido con la pandemia de COVID-19—; en ese periodo, el dengue causó 124 519 casos



y 450 defunciones cada año. A pesar de las diferencias interanuales, la tendencia de casos totales desde 2021 se mantiene al alza, lo que significa un alto impacto en el bienestar de la población y una importante carga para los servicios de salud. Esta variabilidad también se expresa en la distribución geográfica del dengue, que es heterogénea y cambiante. En años recientes, entidades como Sonora, Sinaloa, Veracruz, Jalisco y Guanajuato han concentrado una proporción importante de los casos confirmados. En contraste, estados con mayor altitud y clima templado o frío (Tlaxcala, Ciudad de México y partes de Chihuahua, Durango y Za-

catecas) suelen registrar muy pocos casos, debido a condiciones menos favorables para la transmisión.

El virus del dengue pertenece a un conjunto de virus conocidos como arbovirus, que incluye más de 500 virus distintos, llamados así en alusión al término en inglés *arthropod-borne*, que literalmente significa “transportado por artrópodos” y se usa para describir a los virus que necesitan animales como mosquitos, moscas o garrapatas para pasar de una persona enferma a otra sana.

Al igual que el resto de los virus, el del dengue es una partícula infecciosa muy pequeña que no tiene vida propia y no puede reproducirse por sí sola.

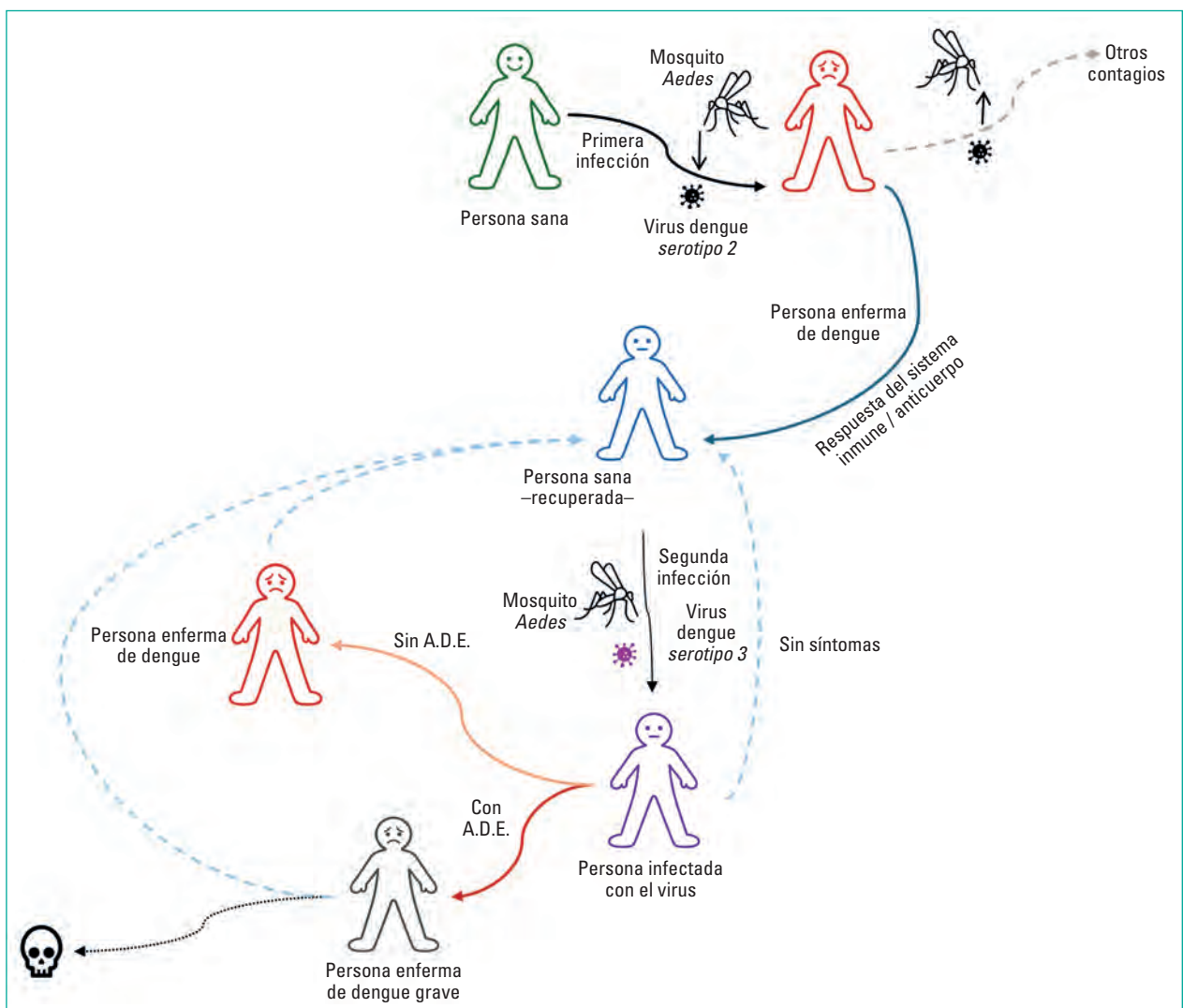


Figura 1. Dinámica del dengue en infecciones primarias y secundarias. Ciclo y evolución del dengue en el cuerpo. Una primera infección suele dejar defensas contra ese tipo de virus. Pero si la persona se infecta después con otro tipo, esas defensas pueden no funcionar igual e incluso favorecer el daño (A.D.E.), aumentando el riesgo de dengue grave en algunos casos. Ilustración elaborada por el autor con GPT-5.3 de OpenAI.

Su material genético es ARN, que replica con una estrategia que favorece su variabilidad genética a través de mutaciones que influyen en su capacidad de propagarse y causar enfermedad. Para asegurar su permanencia, el virus necesita infectar células tanto de los seres humanos como del mosquito que lo transmite, y utilizar su maquinaria para producir nuevas copias. En las personas, este proceso contribuye al daño de tejidos y a las manifestaciones de la enfermedad, mientras que en el mosquito permite que el virus llegue a las glándulas salivales y pueda transmitirse durante la picadura. En la superficie de la partícula viral se encuentran proteínas que le permiten unirse e ingresar a las células y que además activan la respuesta del sistema inmunitario. En su interior contiene otras proteínas encargadas de copiar su material genético y ensamblar nuevos virus.

Un mismo virus, cuatro caras

■ El virus del dengue existe en cuatro versiones inmunológicas distintas, llamadas serotipos. Aunque son variantes del mismo virus, tienen pequeñas diferencias en sus **proteínas de superficie** que hacen que el sistema inmunológico los reconozca como diferentes.

La circulación de los serotipos del virus del dengue no es fija, cambia con el tiempo y entre regiones, de modo que en un mismo lugar pueden predominar distintos serotipos en diferentes años, o incluso coexistir varios al mismo tiempo. Esta dinámica es importante porque la gravedad de la enfermedad puede estar relacionada con el historial inmunológico de la persona: alguien que se infecta por primera vez suele presentar cuadros leves o moderados, mientras que una infección posterior por un serotipo diferente al de la primera enfermedad puede aumentar el riesgo de manifestaciones más intensas, provocando un fenómeno biológico conocido como “amplificación dependiente de anticuerpos” (ADE, por las siglas en inglés de *antibody-dependent enhancement*). Por ello, los cambios de los serotipos que circulan en un lugar influyen en el tipo de casos que se observan durante cada brote.

ADE: la inmunidad que puede complicar la infección

■ Como se mencionó, el ADE es un efecto paradójico muy poco frecuente en el que el sistema inmune provoca daño sobre el mismo cuerpo. Para entender el mecanismo por el cual ocurre, es conveniente recordar los pasos básicos de la respuesta inmune habitual ante microorganismos (virus, bacterias, hongos, parásitos, priones), así como frente a otros compuestos, sustancias o materiales que se identifiquen como ajenos al cuerpo.

Primero: al entrar un virus al cuerpo, las células de primer contacto del sistema inmune lo identifican, lo atrapan y lo llevan hacia su interior como si lo estuvieran comiendo; esto ocurre generalmente en el torrente sanguíneo o en el sitio de la picadura del mosquito en el caso del virus del dengue.

Segundo: ya que la célula tiene al virus en su interior, activa una serie de procesos químicos que tienen como propósito romperlo en fragmentos pequeños y enseñárselo a las otras células del sistema inmune para que hagan una respuesta más específica y duradera a través de la producción de anticuerpos específicos que reconozcan al virus, así como células de ataque directo.

Tercero: cuando el cuerpo ya tiene anticuerpos contra el virus circulando permanentemente en la sangre, en el siguiente encuentro con él lo reconocen rápidamente y se activa una respuesta más eficiente al facilitar que otras células del sistema inmune detecten al virus con los anticuerpos pegados y lo eliminen más rápido.

En el fenómeno de ADE que ocurre en el dengue, los anticuerpos generados en contra el virus de un serotipo en particular durante una primera infección pueden favorecer que al llegar los virus de otro serotipo diferente en una infección subsecuente, éstos sean interiorizados a las células del sistema inmune de manera muy eficiente, pero que no se eliminen correctamente y, en lugar de eliminarlos, se favorezca el ciclo de replicación del virus dentro de las células, con los daños que esto provoca.

Afortunadamente, no todas las segundas infecciones por dengue provocan enfermedad grave, pero sí se ha observado que el riesgo aumenta cuando una

Proteína de superficie

Molécula ubicada en la parte externa de un virus, que le permite unirse e interactuar con las células. Es una molécula clave para iniciar la infección y también para que el sistema inmune reconozca al virus.

persona que ya tuvo dengue se infecta con un serotipo diferente. Este mayor riesgo se asocia con el ADE, aunque no puede medirse directamente en la práctica clínica. En términos generales, la mayoría de las infecciones secundarias cursan sin complicaciones, pero la probabilidad de dengue grave es varias veces mayor que en una primera infección. La edad en la que esto ocurre depende del patrón de transmisión en cada región: en zonas donde el virus circula intensamente desde hace décadas, las segundas infecciones suelen presentarse en la infancia; en otras regiones, como en buena parte de América Latina, pueden afectar con mayor frecuencia a adolescentes y adultos jóvenes. Además, algunos estudios han señalado que ciertas combinaciones de serotipos (particularmente aquellas que involucran al virus del serotipo 2) se han asociado con mayor gravedad, aunque ningún patrón es absoluto. La gravedad no depende sólo del virus, sino también de la historia

inmunológica y de la respuesta individual de cada persona.

El ADE: encrucijada para el desarrollo de vacunas contra el dengue

El ADE impone un reto central para el desarrollo de vacunas contra el dengue: no basta con inducir anticuerpos, sino que éstos deben ser suficientemente potentes y equilibrados frente a los cuatro serotipos para evitar respuestas parciales que pudieran favorecer complicaciones durante una infección posterior. En teoría, una vacuna que no induzca protección completa frente a los cuatro serotipos podría, en personas sin infección previa, comportarse inmunológicamente como una primera exposición y modificar el riesgo en infecciones posteriores.

Esto obliga a diseñar vacunas que contengan elementos de los cuatro serotipos virales (tetravalentes)



Figura 2. Desarrollo de vacunas contra el dengue. El proceso integra investigación básica, caracterización viral, evaluación inmunológica y ensayos clínicos para lograr formulaciones seguras y eficaces, capaces de inducir protección equilibrada frente a los cuatro serotipos del virus. Ilustración elaborada por el autor con GPT-5.3 de OpenAI.

capaces de generar protección homogénea, algo complejo tanto desde el punto de vista inmunológico como desde la perspectiva biotecnológica e industrial para la elaboración del producto. Además, la evaluación clínica de la vacuna durante el desarrollo enfrenta dificultades prácticas, pues los estudios deben realizarse idealmente en regiones donde circulen simultáneamente varios serotipos, ya que el predominio temporal de uno solo puede distorsionar la estimación de eficacia y seguridad. A ello se suma que no hay una forma definitiva de medir la protección a través de algún marcador inmunológico que prediga con certeza quién está protegido, lo que complica interpretar los niveles de anticuerpos y obliga a depender de grandes ensayos clínicos con seguimiento prolongado para confirmar que la vacuna previene tanto la enfermedad como las formas graves.

Las experiencias previas en el desarrollo de vacunas contra dengue han puesto en evidencia dos aspectos críticos desde la perspectiva de la salud pública: la necesidad de una evaluación rigurosa de la seguridad a largo plazo y la consideración del estado inmunológico previo frente al virus. El dengue plantea un reto particular por la coexistencia de cuatro serotipos y el riesgo teórico del ADE, lo que obliga a contar con evidencia sólida antes de su implementación masiva.

En la actualidad, existen dos vacunas contra el dengue que han concluido satisfactoriamente su de-

sarrollo, demostrando eficacia y un perfil de seguridad aceptables tanto en quienes ya tienen anticuerpos contra el virus antes de recibirla como en personas que no los tienen, lo que permite implementar esquemas programáticos más simples en zonas con alta transmisión. Una de ellas, elaborada por un laboratorio privado japonés, ya cuenta con registro para su uso en cuando menos 40 países de Asia, Oceanía y América (regiones fuertemente afectadas por la enfermedad), y ya se utiliza en algunos de ellos mediante estrategias de vacunación focalizadas en regiones específicas donde la problemática por el dengue es muy alta o en respuesta a brotes. Actualmente, esta vacuna está completando los trámites regulatorios en México y se espera que este mismo año pueda estar disponible en el país. La otra, producida por un laboratorio público brasileño, ha sido recientemente autorizada en Brasil, donde comenzará a usarse este año en algunas poblaciones seleccionadas, con la expectativa de fortalecer la respuesta nacional frente al dengue. Además, hay al menos dos candidatos de vacuna contra el dengue que continúan sus trabajos de investigación, uno de otro laboratorio japonés y el otro de un consorcio formado por una institución de investigación pública estadounidense y un laboratorio público brasileño ([Tabla 1](#)).

Es previsible que en el futuro inmediato comience a observarse el efecto de la introducción gradual de las vacunas contra el dengue en los países que han deci-

Tabla 1. Vacunas tetravalentes de virus vivos atenuados contra el dengue disponibles y en desarrollo.

Vacuna [nombre técnico / (nombre comercial)]	Desarrollador / productor (país)	Estado actual	Esquema (dosis)
TAK-003 (Qdenga)	Takeda (Japón)	Registrada en múltiples países; uso focalizado en algunas regiones con alta transmisión. En México se encuentra en proceso de incorporación programática.	Dos
Butantan-DV	Instituto Butantan (Brasil)	Recientemente autorizada en Brasil; implementación inicial en poblaciones seleccionadas.	Una
TV003 /TV005	NIAID (EUA) + Instituto Butantan (Brasil)	En investigación clínica avanzada.	Una
KD-382	Universidad de Nagasaki + KM Biologics (Japón)	Investigación clínica temprana.	En evaluación

dido incorporarlas. Este impacto no será uniforme ni inmediato, pero debería traducirse progresivamente en una reducción de hospitalizaciones, complicaciones graves y defunciones, en particular en los grupos etarios y territorios con mayor carga de enfermedad. En escenarios de transmisión intensa y recurrente, donde los sistemas de salud enfrentan presión significativa, la vacunación podría contribuir a mitigar picos epidémicos y a disminuir el impacto social y económico asociado a los brotes.

No obstante, el verdadero alcance de este efecto dependerá de factores como las coberturas alcanzadas, la oportunidad en la aplicación de los esquemas, la **vigilancia epidemiológica** y la integración efectiva con las estrategias de control vectorial. Si se implementan de manera estratégica y sostenida, las vacunas tienen el potencial de convertirse en un componente clave dentro de un abordaje integral que permita reducir de forma significativa la carga del dengue en los contextos más afectados.

En términos de salud pública, una vacuna ideal no sólo debe proteger a los individuos que la reciben, sino generar un impacto medible a nivel po-

blacional, contribuyendo a reducir la transmisión y la carga global de la enfermedad. Para ello, debe ser económicamente accesible (preferentemente de bajo costo) y viable desde el punto de vista técnico y operativo: fácil de administrar, con esquemas simples y con requerimientos logísticos que faciliten su almacenamiento, distribución y conservación dentro de los sistemas rutinarios de inmunización. En este contexto, es fundamental subrayar que las vacunas contra dengue deben entenderse como una herramienta adicional que se suma al conjunto de intervenciones ya existentes, y no como un sustituto de ellas. Su implementación, por prometedora que sea, no puede ni debe reemplazar las estrategias tradicionales de control vectorial, que siguen siendo el pilar para reducir la transmisión del virus. Del mismo modo, resulta indispensable mantener y fortalecer el diagnóstico oportuno (tanto clínico como de laboratorio), asegurar el manejo adecuado de los pacientes y aplicar estrictamente los protocolos de atención, especialmente en los casos hospitalizados, donde la vigilancia estrecha puede marcar la diferencia entre la recuperación y las complicaciones graves.

Vigilancia epidemiológica

Conjunto de actividades para recopilar, analizar y monitorear información sobre enfermedades, con el fin de detectar cambios, brotes o riesgos y tomar decisiones para prevenirlas y controlarlas.



Asimismo, la vigilancia epidemiológica continua es esencial para identificar cambios en los patrones de circulación viral, detectar brotes tempranamente y orientar decisiones programáticas.

La experiencia acumulada demuestra que el dengue no se controla con una sola intervención. Requiere persistencia, coordinación intersectorial y decisiones basadas en evidencia. Las vacunas representan un avance significativo, pero su verdadero valor dependerá de incorporarlas con inteligencia dentro de una estrategia integral y sostenida.

Mauricio Rodríguez Álvarez

Departamento de Microbiología y Parasitología, Facultad de Medicina, UNAM.

maurodriguez@icloud.com

Lecturas recomendadas

- Aynekulu Mersha, D. G., I. van der Sterren, L. P. M. van Leeuwen, T. Langerak, M. S. Hakim *et al.* (2024), "The role of antibody-dependent enhancement in dengue vaccination", *Tropical Diseases Travel Medicine and Vaccines*, 10(1):22. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s40794-024-00231-2>.
- CDC (2025), "Vaccine Eligibility and Recommendations / Dengue", Centers for Disease Control and Prevention [en línea]. Disponible en: <https://www.cdc.gov/dengue/hcp/vaccine/eligibility.html>, consultado el 27 de abril de 2026.
- Izmirly, A. M., S. O. Alturki, S. O. Alturki, J. Connors y E. K. Haddad (2020), "Challenges in Dengue Vaccines Development: Pre-existing Infections and Cross-Reactivity", *Frontiers in Immunology*, 11:1055. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fimmu.2020.01055>.
- OMS (2025), "Vacunas e Inmunización: dengue", Organización Mundial de la Salud [en línea]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/questions-and-answers/item/dengue-vaccines>, consultado el 27 de abril de 2026.
- Paz-Bailey, G., L. E. Adams, J. Deen, K. A. Anderson y L. C. Katzelnick (2024), "Dengue", *Lancet*, 403(10427):667-682. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(23\)02576-x](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(23)02576-x).
- WHO (2024), "who position paper on dengue vaccines – May 2024", World Health Organization, Weekly Epidemiological Record [en línea]. Disponible en: <https://www.who.int/publications/i/item/who-wer-9918-203-224>, consultado el 27 de abril de 2026.

Una historia en evolución: cómo cambian los virus del dengue y qué significa para nuestra salud

Resumen

El dengue es el virus transmitido por vector más importante del mundo, tanto por el número de casos que provoca como por su expansión geográfica. En este artículo abordamos los procesos evolutivos que le permitieron adaptarse al ciclo mosquito-humano, las restricciones evolutivas de su transmisión y cómo los cambios en la dominancia de los serotipos se relacionan con brotes epidémicos importantes, destacando la importancia de la vigilancia genómica viral.

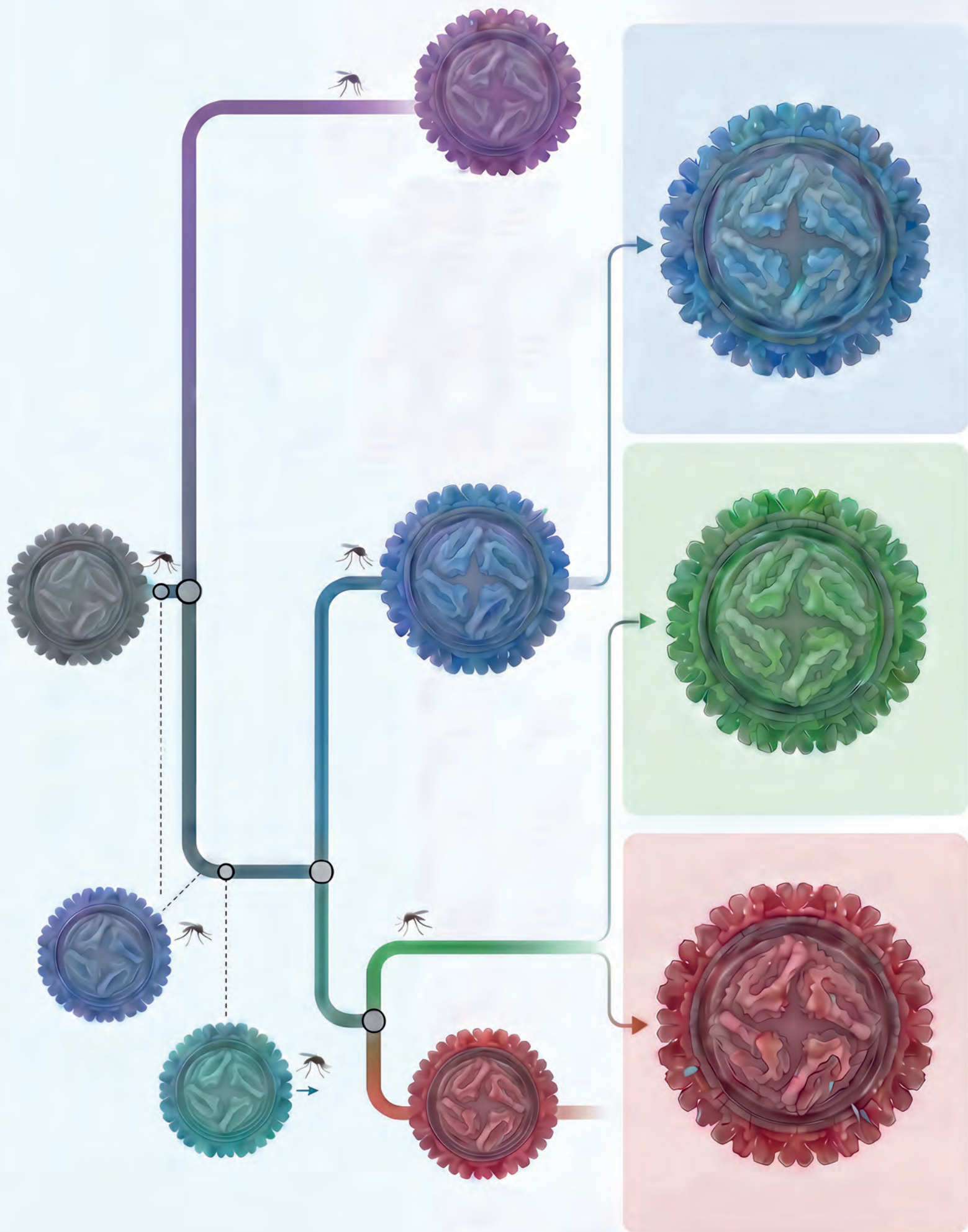
Abstract

Dengue is the most important vector-borne virus worldwide due to its high burden and its geographic expansion. In this article, we discuss the evolutionary processes that enabled its adaptation to the mosquito-human cycle, the evolutionary constraints imposed by transmission, and how shifts in serotype dominance are linked to major epidemic outbreaks, highlighting the importance of viral genomic surveillance.

¿De dónde viene el virus del dengue?

El virus del dengue pertenece a un grupo de virus capaces de infectar tanto a animales vertebrados como a invertebrados. Su transmisión ocurre a través de artrópodos, especialmente mosquitos, que se alimentan de la sangre de los vertebrados. Durante este proceso, el virus puede transmitirse del mosquito al animal, o del animal infectado al mosquito. Por esta razón, los llamamos *arbovirus*, término que proviene del inglés *arthropod-borne viruses* y que podemos traducir como “virus transmitidos por artrópodos”.

Durante mucho tiempo, los científicos han debatido sobre cómo evolucionó este tipo de virus: por un lado, los arbovirus podrían haber sido originalmente virus de artrópodos que después adquirieron la capacidad de infectar vertebrados; por otro lado, podrían haber sido virus de vertebrados que adquirieron la capacidad



Estudios metagenómicos

Se usan para determinar la secuencia de todo el material que hay en una muestra y conocer la diversidad de especies bacterianas y virales presentes.

Interferón

Proteínas del sistema inmune encargadas de iniciar la respuesta antiviral.

de infectar artrópodos. Todo indica que su historia evolutiva es diversa, con varios orígenes y adaptaciones a lo largo del tiempo que dieron origen a los arbovirus que conocemos hoy.

En el caso del virus del dengue, que pertenece a la familia Flaviviridae, la idea más aceptada es que originalmente fueron virus específicos de insectos que en algún momento adquirieron la capacidad de infectar vertebrados. Esta idea se ha fortalecido gracias a **estudios metagenómicos**, que consisten en secuenciar todo el material genético de una muestra. Este enfoque ha permitido descubrir numerosos virus que infectan exclusivamente a insectos y que están relacionados evolutivamente con los arbovirus. Por otro lado, se han descubierto en ratones y murciélagos otros flavivirus que se denominan de “vector desconocido”, pero que, al parecer, no pueden transmitirse por un vector.

Con esta evidencia, se ha propuesto que la transición hacia un ciclo mosquito-vertebrado pudo ocurrir en varios pasos, como se ilustra en la **Figura 1**, empezando con virus específicos de insectos que se transmitían al vertebrado durante la alimentación del vector. Después, en un evento poco frecuente, algunos virus adquirieron mutaciones que les permitieron replicarse en el vertebrado. Esto pudo haber ocurrido tras millones de intentos fallidos, donde estos virus se adaptaron a un ciclo de transmisión vector-hospedero que se mantiene hasta la fecha. En algunos casos, la rápida adaptación del virus al vertebrado conllevó a una pérdida de la capacidad de infectar al insecto, lo que dio lugar a los virus de vector desconocido.

Para que un virus pueda tener un ciclo dual (**Figura 1**), debe superar barreras muy distintas en cada hospedero. Una de las diferencias fisiológicas más importantes entre insectos y mamíferos es la temperatura corporal. Las proteínas de superficie de los virus específicos de insectos no son estables a temperaturas superiores a 30 °C, mientras que los virus con ciclo dual sí pueden mantenerse estables a 37 °C, pero también funcionar a temperaturas más bajas cuando están en el mosquito.

Otra gran diferencia está en la respuesta inmune. En artrópodos, la defensa antiviral se centra en el uso de pequeñas moléculas de ARN que bloquean la expresión de proteínas virales. En mamíferos, la respuesta mediada por **interferón** es mucho más compleja e involucra células especializadas. En este sentido, una ventaja para los virus radica en que la saliva de los mosquitos suprime la respuesta inmune local, facilitando la transmisión y establecimiento del virus. La adaptación del virus del dengue a un ciclo de vida dual se evidencia en las funciones adicionales que adquirieron dos proteínas virales que le permiten bloquear la respuesta inmune mediada por interferón.

Un virus atrapado entre dos mundos: las restricciones evolutivas

Los virus capaces de infectar a más de un hospedero enfrentan un reto evolutivo particular: el hecho de que lo que funciona bien en un hospedero no necesariamente funciona bien en otro. Dicho de otra



Figura 1. Proceso de transición evolutiva. El origen del virus del dengue, al igual que el de otros arbovirus, probablemente se encuentra en virus específicos de insectos. La exposición continua de los mosquitos a hospederos vertebrados durante la alimentación de sangre, junto con mutaciones que por azar le permitieron al virus replicarse en vertebrados, llevó al establecimiento de un ciclo de transmisión dual.

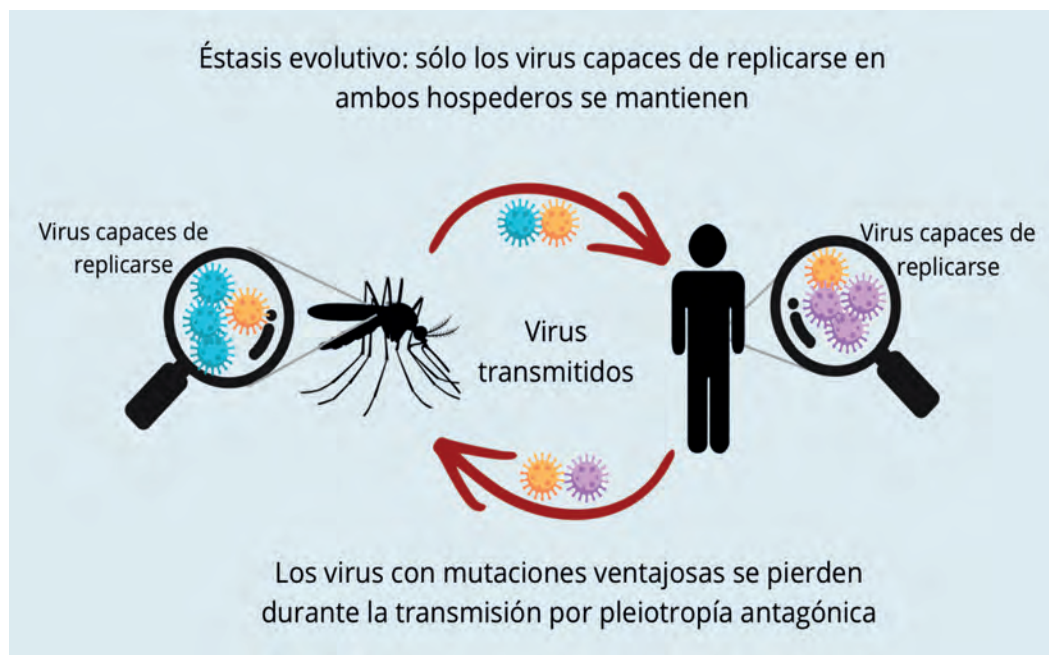


Figura 2. Éstasis evolutivo en los arbovirus. El ciclo de vida dual representa una presión selectiva que favorece a los virus generalistas; es decir, aquellos capaces de replicarse en ambos hospederos, aunque no sean los más aptos en ninguno de los dos ambientes. Este fenómeno se explica por la pleiotropía antagónica, en la cual mutaciones ventajosas en un ambiente son desfavorables en el otro, por lo que estos cambios tienden a eliminarse.

forma: una mutación del virus que le da una ventaja en los vertebrados puede resultar inútil, o incluso perjudicial, cuando el virus regresa al mosquito.

Imaginemos, por ejemplo, que al replicarse en un vertebrado, aparece una mutación que mejora la entrada del virus a la célula o aumenta la cantidad de partículas virales producidas. Cuando ese virus regresa al mosquito, esa misma mutación puede convertirse en un problema, puede reducir la replicación o afectar el ensamblaje de las partículas virales. Si esto ocurre con frecuencia, muchas mutaciones que son beneficiosas en un hospedero se pierden en el otro. A este tipo de “compensación” se le conoce como *pleiotropía antagónica*, pues una misma mutación tiene dos efectos contrarios, lo que frena la evolución del virus (Figura 2).

Como consecuencia de la pleiotropía antagónica, los arbovirus suelen tener una tasa de evolución más lenta de lo que se esperaría a partir de su tasa de mutación; por ejemplo, poblaciones de virus del dengue tipo 2 se han mantenido estables durante 30 años en el sudeste asiático, a pesar de que se replican continuamente. Aun así, sabemos que los arbovirus pue-

den adquirir cambios ventajosos sin pagar un costo elevado en el otro hospedero.

Por ejemplo, en los últimos años hemos sido testigos de la expansión del virus del dengue tipo 3 en el continente americano, la cual se ha asociado con mutaciones en la proteína E que podrían mejorar la afinidad del virus por los receptores de las células humanas. En algunos casos, estas mutaciones que hacen al virus más infectivo en humanos no afectan de forma importante su funcionamiento en el mosquito. Esto le permite mantener su ciclo entre ambos hospederos, a pesar de las grandes diferencias entre ellos.

Otro ejemplo interesante son los ARN subgenómicos (sfARN). Durante la infección, el genoma viral comienza a degradarse, pero los virus del dengue poseen estructuras que detienen este proceso antes de que sea completo, permitiendo que se acumulen estos fragmentos. Los sfARN actúan como “esponjas” que interfieren con la respuesta antiviral de la célula. Como este mecanismo funciona tanto en el mosquito como en humanos, las mutaciones que lo favorecen resultan ventajosas en ambos hospederos.

Un último ejemplo involucra la proteína viral NS1, que no sólo se encuentra dentro de las células, sino que también puede circular en la sangre de la persona infectada. Algunas mutaciones en esta proteína aumentan la cantidad de NS1 en la sangre. Cuando el mosquito ingiere esta sangre con niveles elevados de NS1, se inhibe la respuesta inmune en su intestino, lo que facilita la infección y aumenta la transmisibilidad del virus. De esta manera las mutaciones adquiridas durante la replicación en el humano pueden ser beneficiosas tanto para la transmisión como para la replicación del virus en el mosquito.

Estos ejemplos nos muestran que, aunque los arbovirus están limitados por la necesidad de adaptarse a dos hospederos muy distintos, existen caminos evolutivos que les permiten mejorar su transmisión sin pagar un alto costo. Cuando estas ventajas se combinan con factores ambientales, sociales y demográficos, pueden traducirse en cambios visibles en la circulación del virus.

Cambios globales, consecuencias locales

■ En las últimas décadas, el dengue se ha vuelto una de las enfermedades virales transmitidas por mosquitos más importantes del mundo. Su expansión se refleja tanto en el aumento en la cantidad de casos reportados anualmente como en la extensión de su distribución geográfica. Países o regiones que antes tenían transmisión esporádica o casi nula ahora se han encontrado con brotes recurrentes, y regiones que eran consideradas de riesgo intermedio ahora están sufriendo circulación sostenida.

Este fenómeno mundial responde a múltiples causas. La urbanización rápida ha creado condiciones óptimas para que el mosquito *Aedes aegypti* se reproduzca, ya que en las zonas urbanas hay recipientes artificiales con agua donde depositar sus huevos. A ello se suma la movilidad humana (turismo, migración y comercio), que permite que el virus llegue a nuevas zonas, y los cambios climáticos, que afectan tanto la abundancia del mosquito como la duración de la temporada de transmisión.

El dengue no es un virus único, pues existen cuatro serotipos (DENV-1, DENV-2, DENV-3 y DENV-4), cuya

predominancia puede cambiar con el tiempo. Los virus de un mismo serotipo tienen el mismo perfil antigénico; es decir, los mismos anticuerpos los reconocen, aunque pueden tener diferencias en su secuencia genética. La infección por uno de ellos genera inmunidad sólo contra ese serotipo, pero no contra los otros. Esto crea un equilibrio dinámico en el que los serotipos se sustituyen mutuamente cuando las condiciones inmunológicas de la población se modifican. Es decir, cuando un serotipo circula durante muchos años, gran parte de la población obtiene protección frente a él, creando condiciones para que otro serotipo encuentre una población más vulnerable y logre expandirse.

Estos eventos de reemplazo se han reportado en regiones tropicales y subtropicales de América, Asia y África, donde un serotipo que domina ha sido reemplazado por otro que se halla en una población menos protegida. Estos cambios suceden de forma gradual entre países, reflejando una dinámica de interconexión geográfica, en la que México no es la excepción. Durante varios años, los serotipos comunes en el país fueron el DENV-1 y el DENV-2, variando según el año (**Figura 3**). Sin embargo, a partir de 2022 se observó una transición gradual hacia el DENV-3 y en el 2024 este serotipo se convirtió en el más predominante a nivel nacional. Este reemplazo no ocurrió de manera uniforme en todo el país (**Figura 4**). En algunas regiones del sur y sureste, el aumento del DENV-3 fue más rápido y temprano, en contraste con otras regiones donde el DENV-2 se mantuvo por más tiempo. Asimismo, en otros estados, ambos serotipos coexistieron por un tiempo hasta que el DENV-3 se volvió el predominante. Esto muestra que el reemplazo de serotipos depende de las dinámicas locales, de las introducciones específicas del virus y del nivel de inmunidad de la población.

Asimismo, el aumento del DENV-3 en México coincidió con cambios clínicos a nivel poblacional. Cuando este serotipo comenzó a ser predominante, se registró un aumento tanto en las hospitalizaciones como en los casos con signos de alarma. A pesar de que muchos factores afectan la gravedad clínica, la evidencia epidemiológica sugiere que las alteraciones en la circulación de serotipos tienen el potencial de modificar el perfil de riesgo poblacional.

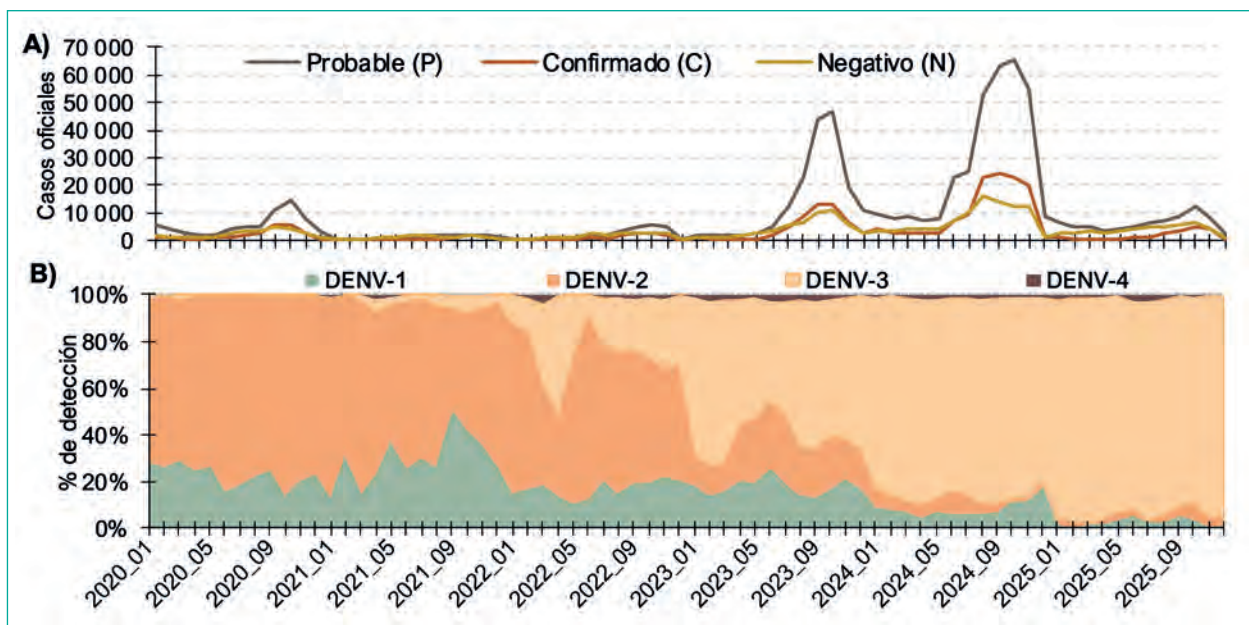


Figura 3. Casos y serotipos circulantes de dengue en México. A) Número de casos probables y confirmados de dengue entre 2020 y 2025; también se muestran las pruebas diagnósticas con resultado negativo. B) Porcentaje de serotipos detectados en el mismo periodo.

Mirar el genoma para entender la historia

El análisis de serotipos sólo ofrece una parte de la historia. Para entender con mayor precisión la evolución y la dispersión del dengue, no basta con saber el serotipo, sino que hay que comparar el material genético del virus. Por ejemplo, el DENV-3 que se ex-

pandió recientemente en nuestro país no es el mismo que se detectó años atrás en México. ¿Cómo lo sabemos? Porque su genoma muestra diferencias que no se capturan en la clasificación por serotipo.

Los virus como el dengue se replican con gran rapidez y pueden incorporar mutaciones en cada ciclo

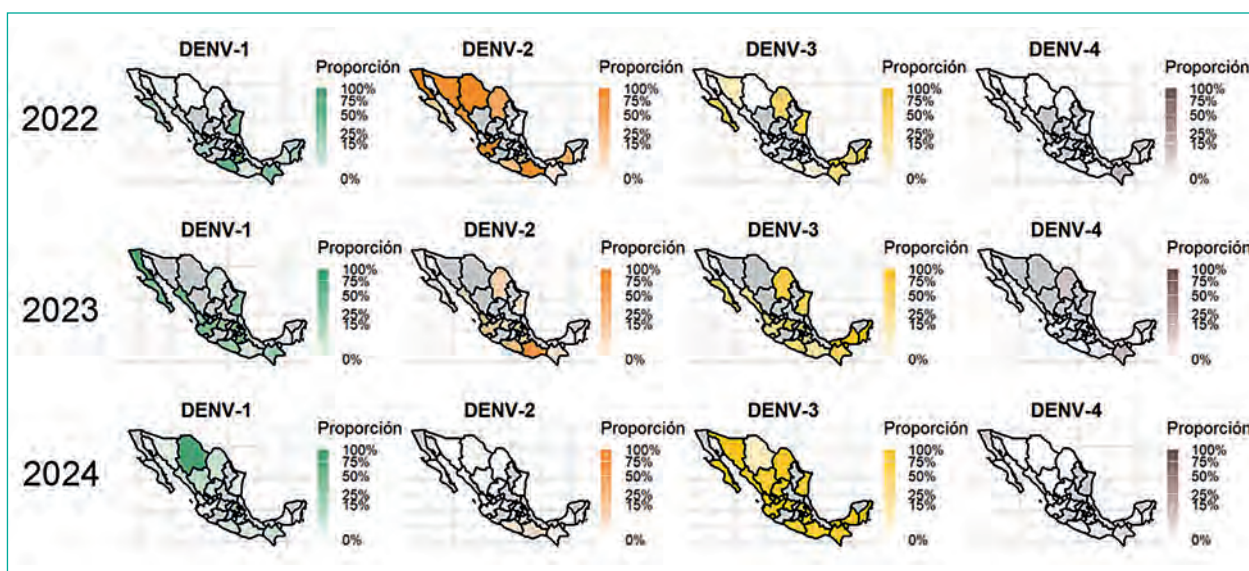


Figura 4. Distribución de casos de dengue por estado y serotipo. Los mapas muestran la frecuencia de cada serotipo por estado en cada año. La intensidad del color indica un mayor porcentaje de casos asociados a un serotipo particular. Los estados en gris corresponden a aquellos sin datos reportados en ese año.

de replicación. Estos cambios funcionan como una huella que permite reconstruir su historia evolutiva. Por esto, dentro de cada serotipo no circula un virus idéntico, sino varios grupos de virus emparentados, conocidos como linajes, que comparten un ancestro común reciente.

Cuando se comparan sus genomas, es posible reconstruir árboles filogenéticos –similares a árboles genealógicos–, donde cada rama representa un conjunto de virus que ha acumulado cambios específicos. Con el tiempo, estas ramas pueden dividirse en subramas conforme el virus continúa replicándose y acumulando modificaciones. Aunque clínicamente todos se denominen, por ejemplo, DENV-3, el análisis filogenético permite distinguir entre virus que han circulado localmente durante años y aquellos que han sido introducidos recientemente desde otras regiones.

Los estudios filogenéticos han mostrado que muchos de los linajes que hoy circulan en América Latina descienden de virus asiáticos introducidos en distintos momentos históricos. Estas introducciones se reflejan en el árbol filogenético como nuevas ramas que, una vez establecidas, se diversifican en el continente. Sin embargo, la diversidad que observamos no se explica sólo por la entrada de nuevos linajes, sino también por la evolución local de los linajes ya establecidos, que con el tiempo se subdividen en sublinajes. En conjunto, la dinámica típica combina introducciones recurrentes con diversificación local y, en ocasiones, con reemplazos graduales.

México forma parte de esta red de intercambio viral en América Latina, donde los linajes detectados comparten historia evolutiva con virus reportados en Centroamérica, Sudamérica y el Caribe. En este contexto se inserta lo ocurrido recientemente con el DENV-3. El análisis filogenético muestra que el virus que se expandió a partir del 2022 no corresponde con el mismo grupo genético detectado años atrás en el país. Aunque pertenece al mismo serotipo, se integra en un linaje distinto, también reportado en otros países del continente. De hecho, durante un periodo transitorio se observó la coexistencia de ambos linajes, lo que indica que el proceso de reemplazo no fue abrupto, sino progresivo. Además, el patrón evolutivo sugiere múltiples eventos de intro-

ducción, en lugar de una única expansión desde un foco local. Esto refuerza la importancia de considerar la conectividad regional como un elemento central en la dinámica del dengue en México.

La vigilancia genómica consiste precisamente en secuenciar y comparar los genomas virales obtenidos en distintos pacientes y estados del país. Al hacerlo, es posible identificar patrones de dispersión, detectar introducciones recientes y comprender cómo un grupo viral logra expandirse hasta desplazar a otros. Así, el reemplazo observado en México no fue simplemente un cambio “de nombre” dentro del DENV-3, sino el resultado de la expansión de un linaje viral distinto, cuya trayectoria pudo reconstruirse a partir del análisis de su genoma.

¿Por qué es importante estudiar la evolución del dengue en México?

Estudiar la evolución del dengue no es únicamente una actividad académica, sino que tiene un impacto directo en la salud pública. Permite identificar nuevos linajes del virus antes de que se expandan, reconstruir sus rutas de dispersión dentro del país y entender por qué ciertos periodos presentan incrementos abruptos en el número de casos.

Por ejemplo, el aumento del DENV-3 en México a partir del 2022 coincidió con condiciones ambientales favorables, incluyendo temperaturas medias elevadas en diversos estados, así como con cambios en la estacionalidad, ya que la transmisión se extendió hacia meses tradicionalmente considerados de baja actividad. La combinación de diversos factores, junto con la introducción de un nuevo linaje, ilustra cómo procesos evolutivos y ambientales pueden in-



teractuar para amplificar el impacto de una enfermedad, reflejándose tanto en el aumento de casos en el país como en su gravedad.

El seguimiento de la evolución viral es indispensable para el desarrollo y la evaluación de vacunas y tratamientos, ya que los cambios genéticos del virus pueden influir en su eficiencia. Contar con información actualizada permite anticipar posibles fallos en la protección inmunológica y apoyar el diseño de estrategias de control más efectivas.

México tiene una posición estratégica en América Latina, tanto por su conectividad internacional como por la diversidad ecológica de su territorio. Esto lo convierte en un país clave para la introducción y dispersión de linajes virales. Asimismo, el hecho de que en buena parte del país existan las condiciones ambientales propicias para el desarrollo del mosquito vector contribuye a la persistencia del virus. La vigilancia genómica permite observar estos cambios invisibles. El diagnóstico clínico verifica la existencia del dengue, mientras que el análisis genómico permite conocer su origen, su evolución y sus patrones de propagación.

Comprender la evolución del dengue, en medio de un entorno de urbanización acelerada, movilidad humana elevada y cambio climático, no sólo ayuda a explicar el presente, también permite prever escenarios futuros. El dengue no es el mismo virus cada año y entender sus cambios, tanto epidemiológicos como ecológicos y evolutivos, es esencial para mejorar la respuesta frente a los brotes que aún están por venir.

Blanca Taboada

Departamento de Genética del Desarrollo y Fisiología Molecular, Instituto de Biotecnología, UNAM, Cuernavaca, Morelos.

blanca.taboada@ibt.unam.mx

Selene Zárate

Posgrado en Ciencias Genómicas, Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

selene.zarate@uacm.edu.mx

Agradecimiento

Proyecto financiado gracias a su aprobación en la Convocatoria Ciencia Básica y de Frontera 2025 de la SECITI (SECITI CBF-2025-I-1026).

Referencias específicas

- Baak-Baak, C. M., N. Cigarroa-Toledo, J. F. Pinto-Castillo, R. C. Cetina-Trejo, O. Torres-Chable *et al.* (2022), "Cluster analysis of dengue morbidity and mortality in Mexico from 2007 to 2020: Implications for the probable case definition", *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 106(5):1515-1521. Disponible en: <https://doi.org/10.4269/ajtmh.21-0409>.
- Bamford, C. G. G., M. W. de Souza, R. Parry y R. J. Gifford (2022), "Comparative analysis of genome-encoded viral sequences reveals the evolutionary history of flavivirids (family *Flaviviridae*)", *Virus Evolution*, 8(2). Disponible en: <https://doi.org/10.1093/ve/veac085>.
- Bhatia, S., D. Bansal, S. Patil, S. Pandia, Q. M. Ilyas y S. Imran (2022), "A retrospective study of climate change affecting dengue: Evidences, challenges and future directions", *Frontiers in Public Health*, 10:884645. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.884645>.
- Cook, S. y E. A. Holmes (2006), "Multigene analysis of the phylogenetic relationships among the flaviviruses (Family: *Flaviviridae*) and the evolution of vector transmission", *Archives of Virology*, 151:309-325. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00705-005-0626-6>.
- Dolan, P. T., S. Taguwa, M. Aguilar, A. Acevedo, T. Hagi *et al.* (2021), "Principles of dengue virus evolvability derived from genotype-fitness maps in human and mosquito cells", *eLife*, 10:e61921. Disponible en: <https://doi.org/10.7554/elife.61921>.
- Raafat, N., S. Loganathan, M. Mukaka, S. D. Blacksell y R. J. Maude (2021), "Diagnostic accuracy of the WHO clinical definitions for dengue and implications for surveillance: A systematic review and meta-analysis", *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 15(4):e0009359. Disponible en: <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0009359>.
- Wei, K. y Y. Li (2017), "Global evolutionary history and spatio-temporal dynamics of dengue virus type 2", *Scientific Reports*, 7:45505. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/srep45505>.

Andrea Gloria-Soria y Jacquelyn C. LaReau

Aedes aegypti en América: la ruta histórica de un mosquito viajero

Resumen

El mosquito *Aedes aegypti* no es originario de América. Su llegada al continente está ligada a procesos históricos como la colonización del continente americano, el comercio transatlántico y los movimientos humanos a gran escala. Este artículo recorre la ruta histórica de este mosquito, desde su origen en las islas del océano Índico, hasta su establecimiento en América, explicando cómo se adaptó a los entornos urbanos y se convirtió en un eficiente transmisor de virus como el dengue, zika y chikungunya. Comprender su historia permite entender los retos actuales para su control y prevención.

Abstract

The *Aedes aegypti* mosquito is not native to the Americas. Its arrival to the continent is tightly linked to historical processes such as the European colonization of the continent, transatlantic trade, and large-scale human migrations. In this article we review the history of this mosquito, from its origin in the Southwest Indian Ocean to its establishment in the Americas, its adaptation to urban environments, and how it became an efficient vector of viral diseases such as dengue, Zika, and chikungunya. Understanding *Ae. aegypti*'s evolutionary history helps to design strategies aimed to prevent and control diseases transmitted by this mosquito.

Aedes aegypti, el mosquito de la fiebre amarilla

En el mundo existen aproximadamente 3 600 especies de mosquitos. Un centenar de ellas se alimentan de sangre humana y pueden transmitir enfermedades infecciosas como la malaria, filariasis, dengue, zika y chikungunya, entre otras. El mosquito *Aedes aegypti* ha causado grandes epidemias a nivel mundial y cambiado la historia de la humanidad.



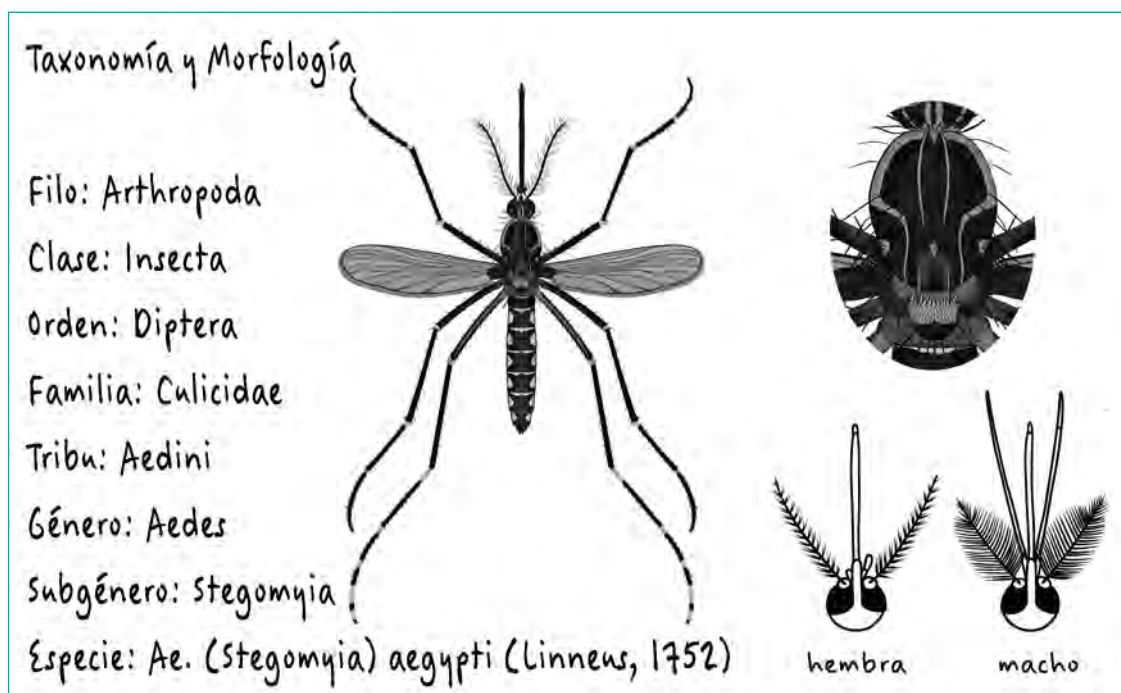


Figura 1. Taxonomía y morfología.

El *Aedes aegypti* es conocido como el mosquito de la fiebre amarilla, por ser responsable de las epidemias de fiebre amarilla que asediaron a América entre los siglos XVII y XIX. La enfermedad fue traída desde África por los conquistadores españoles con la trata de esclavos. En su etapa grave, la enfermedad vuelve la piel amarilla (de ahí su nombre “fiebre amarilla”), oscurece la orina y produce un vómito negro causado por hemorragias gastrointestinales. Aunque se sabía que la fiebre amarilla era contagiosa, fue en 1881 cuando el médico cubano Carlos Finlay implicó al *Ae. aegypti* como intermediario en la transmisión de persona a persona. El concepto de un mosquito como vector de enfermedades infecciosas permitió el control de la fiebre amarilla en La Habana, Cuba, a través de medidas de control y sanidad, y sentó las bases para las campañas de erradicación a nivel continental.

Hoy en día, el riesgo de la fiebre amarilla ha disminuido gracias al desarrollo de una vacuna eficaz. Sin embargo, el *Ae. aegypti* continúa siendo de gran relevancia en salud pública por ser el principal vector de dengue en el mundo.

La transmisión del dengue en el ámbito urbano ocurre en un ciclo entre el mosquito y el humano.

La hembra del mosquito adulto adquiere el virus al alimentarse de la sangre de una persona infectada (que puede o no presentar síntomas) y lo transmite días más tarde a otra persona durante la picadura. La preferencia del *Ae. aegypti* por la sangre humana y su asociación al hábitat urbano son características que hacen de este mosquito un vector ideal de enfermedades arbovirales (*arbo-* del inglés *arthropod-borne*, que significa “transmitidos por artrópodos”), incluidas la fiebre amarilla, el dengue, zika y chikungunya.

Origen del *Aedes aegypti*

Pueden distinguirse dos formas principales del *Ae. aegypti* basadas en la morfología, el comportamiento y la genética. *Ae. aegypti formosus* es un mosquito oscuro, selvático, que habita exclusivamente en África y se cría en depósitos naturales de agua (agujeros de árboles y rocas); sus hembras son **generalistas** y se alimentan de una variedad de mamíferos. *Ae. aegypti aegypti* es la forma urbana, doméstica, más clara, adaptada al ambiente humano, que se cría dentro de recipientes artificiales y cuyas hembras se han especializado en alimentarse de la sangre humana. Esta

Generalista
 Mosquito con hábitos de alimentación flexibles que puede alimentarse de diferentes especies de mamíferos en función de su disponibilidad.

forma urbana, doméstica, que denominaremos Aaa, ocurre fuera de África, predominantemente en las regiones tropicales y subtropicales, y es la forma que se asocia más frecuentemente con la transmisión del dengue a nivel mundial.

El *Ae. aegypti formosus*, al que denominaremos Aaf, se considera la forma ancestral de la que derivó el Aaa. Las poblaciones más antiguas del Aaf se encuentran en las islas del océano Índico, al suroeste de África. Es en esta región donde encontramos a sus parientes (conocidos) más cercanos, *Ae. mascarensis* y *Ae. pia*, en las islas de Mauricio y Mayotte, respectivamente. Es también ahí en donde se originó la especie *Ae. aegypti*, al separarse del *Ae. mascarensis* hace aproximadamente siete millones de años. Estudios recientes que utilizan marcadores genéticos y modelos demográficos sugieren que el *Ae. aegypti* ingresó al continente africano hace menos de 85 000 años, coincidiendo con un periodo en que la lluvia era abundante y habría creado las condiciones adecuadas para el establecimiento del Aaf a lo largo de

la costa del sureste africano. Estos mismos estudios sugieren que el *Ae. aegypti* expandió su distribución en África hace 17 000 a 25 000 años, siguiendo la expansión de los bosques africanos al final del último máximo glacial.

Aunque el Aaf se considera de alimentación generalista, estudios con mosquitos africanos *Ae. aegypti* han demostrado que su preferencia por la sangre humana es variable en la región. Utilizando la información almacenada en el código genético de estos mosquitos, se infiere que la transición del *Ae. aegypti* de la alimentación generalista a la especialización por los humanos inicia en África hace aproximadamente 5 000 años, a consecuencia de los cambios climáticos en el continente, y coincide con la expansión del desierto del Sahara. Esta información sugiere que, en respuesta a los largos periodos de sequía en el Sahel de África occidental, las poblaciones de *Ae. aegypti* al oeste de África encontraron una fuente confiable de agua y alimento en los asentamientos humanos que almacenaban agua para

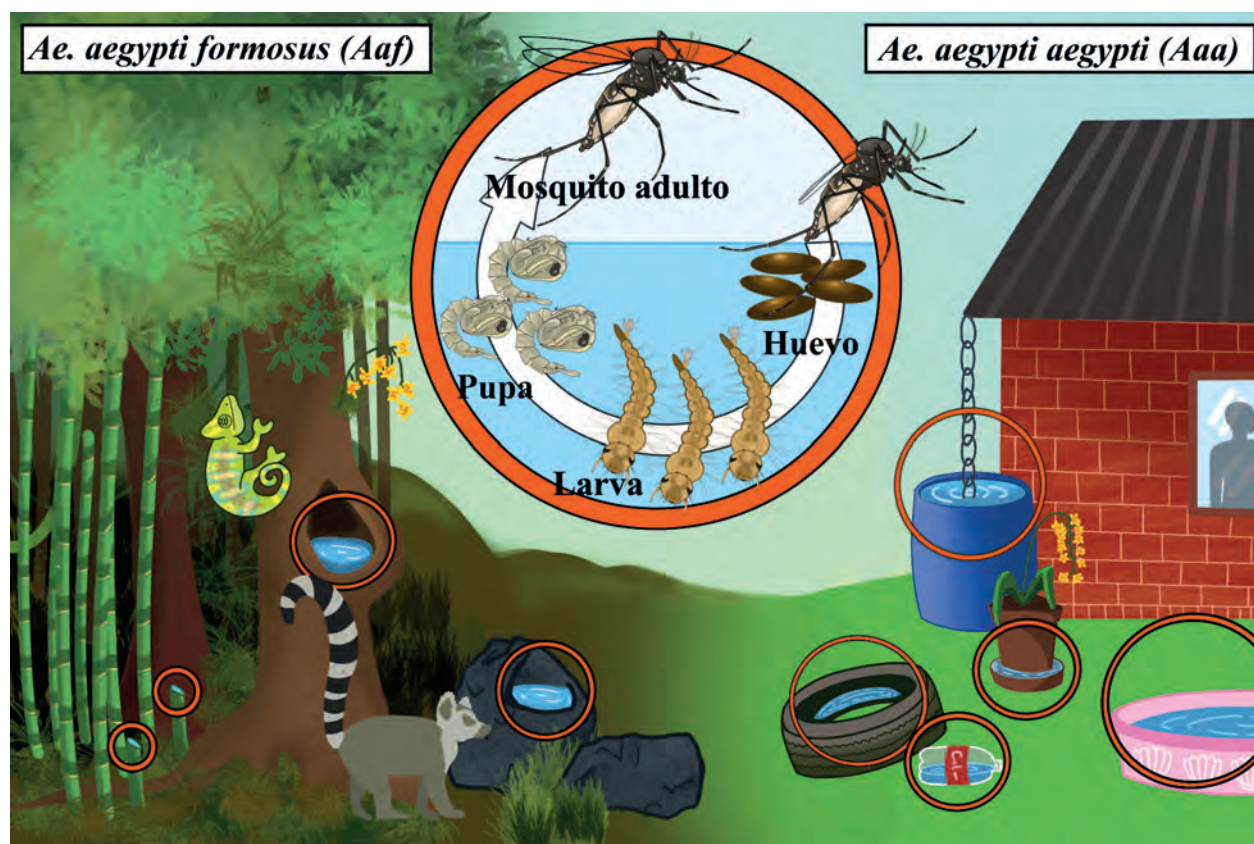


Figura 2. Hábitat del *Aedes aegypti* selvático (Aaf) y doméstico (Aaa).

subsistir. Estas adaptaciones dieron inicio al proceso de “domesticación” que permitiría al *Ae. aegypti* subsistir el largo viaje transatlántico desde África occidental hasta América durante los viajes del descubrimiento europeo que iniciaron en el siglo xv. Esta primera forma doméstica del *Ae. aegypti*, denominada “proto-*aegypti*” es la precursora de la forma especialista e invasiva que después se expandiría por el mundo entero.

Llegada a América e invasión global

La etapa de los grandes viajes de descubrimiento europeo fue impulsada por los avances en las técnicas de navegación y motivada por la búsqueda de rutas alternativas hacia la India. Poco después del descubrimiento de América en 1492, se establece una ruta de comercio triangular entre Europa, África occidental y América. Los barcos partían de los puertos europeos y recogían esclavos negros en las costas de África, los

cuales serían llevados a las plantaciones del Caribe y América para realizar las arduas labores de cosecha. En el Caribe, los barcos recogían provisiones que serían llevadas de regreso a Europa, principalmente ron, azúcar, tabaco, algodón, café y especias. Los registros históricos y datos genéticos indican que la introducción del *Ae. aegypti* al nuevo continente (América) siguió la misma ruta transatlántica. Los mosquitos abordaron los barcos europeos en la costa oeste de África y sobrevivieron al trayecto de varios meses hasta desembarcar en los puertos de América, en donde finalmente se establecerían, y décadas más tarde regresarían a Europa y alcanzarían Asia.

En América, el proto-*aegypti* halló nuevos nichos ecológicos y aproximadamente 100 años después de su llegada al nuevo continente, una vez separado geográficamente de su ancestro selvático por el océano Atlántico, continuó su especialización y dio lugar a la forma urbana, doméstica, invasiva que se expandió por el resto del continente y a la que hoy



Figura 3. Ruta transatlántica del *Aedes aegypti*.

en día conocemos como *Aaa*, el vector por excelencia del dengue y otros arbovirus a nivel mundial.

Los procesos involucrados en la evolución del *proto-aegypti* dentro de América se infieren de la comparación entre el genoma de la última población conocida de *proto-aegypti* que aún existe en Argentina, con el genoma del *Aaa* que abunda hoy en el continente americano. Las partes del genoma que difieren entre los dos grupos sugieren que estos procesos involucraron la adaptación a nuevos patógenos y cambios en su hábito alimentario. Se supone que estos cambios deben haber facilitado la expansión del *Aaa* en América y posteriormente la invasión de Asia y el resto del mundo.

Aunque se desconoce cuál fue la distribución histórica del *proto-aegypti* en América, se cree que existía un mosaico de *proto-aegypti* y *Aaa* a lo largo y ancho del continente hasta principios del siglo xx, cuando las poblaciones del mosquito se ven dramáticamente reducidas gracias a las campañas de erradicación del *Ae. aegypti* para controlar la fiebre amarilla y posteriormente el dengue. Estas campañas, dirigidas inicialmente por la fundación Rockefeller y posteriormente por la Organización Panamericana de la Salud, lograron la erradicación del *Ae. aegypti* en muchos países de América, pero el mosquito nunca fue eliminado en áreas del Caribe, Sudamérica y los Estados Unidos. Desafortunadamente, las campañas fueron interrumpidas hacia 1970 debido al desinterés y falta de fondos, lo que –aunado a la rápida urbanización, falta de sanidad, aumento del tráfico nacional e internacional y la evolución de una resistencia a insecticidas en el *Ae. aegypti*– permitió la inmediata recolonización del continente a partir de las poblaciones remanentes. Basándonos en la distribución actual del *proto-aegypti*, que hoy se encuentra restringida a Argentina, es de suponer que la recolonización favoreció a la forma invasiva *Aaa*, la cual está presente hoy en las zonas tropicales y subtropicales del continente.

Situación actual

 Aunque el *Aaf*, el *Aaa* y el *proto-aegypti* son reproductivamente compatibles, por lo general las formas



del *Ae. aegypti* se mantienen separadas. Sin embargo, la recolonización y subsecuente expansión del *Aaa* en América han generado en décadas recientes zonas de contacto secundario entre *Aaa* y *proto-aegypti* en la frontera entre Argentina y Brasil, dando como resultado híbridos. Fuera de América, la migración y comercio modernos han introducido la forma doméstica *Aaa* en África y encontramos híbridos entre el *Aaa* y el *Aaf* en las costas de ese continente.

El reciente contacto secundario y mezcla entre las diferentes formas del *Ae. aegypti* es alarmante. Investigaciones han demostrado que la forma doméstica invasiva *Aaa* que existe fuera de África transmite mejor el virus del dengue que su contraparte selvática *Aaf*, y estudios preliminares sugieren que el *proto-aegypti* de Argentina tiene una capacidad intermedia. Estos resultados apuntan a que el proceso de domesticación ha incrementado la capacidad del *Ae. aegypti* para transmitir la enfermedad. Por otro lado, siendo el *Aaa* un mosquito urbano, que entra en frecuente contacto con la población humana, está más expuesto a los insecticidas que el *Aaf* y tiende a desarrollar resistencia contra ellos. Debido a las marcadas diferencias que observamos entre las formas de *Ae. aegypti* en su preferencia por sangre humana, sitios de crianza, resistencia a insecticidas y habilidad de transmitir dengue, entre otras, puede

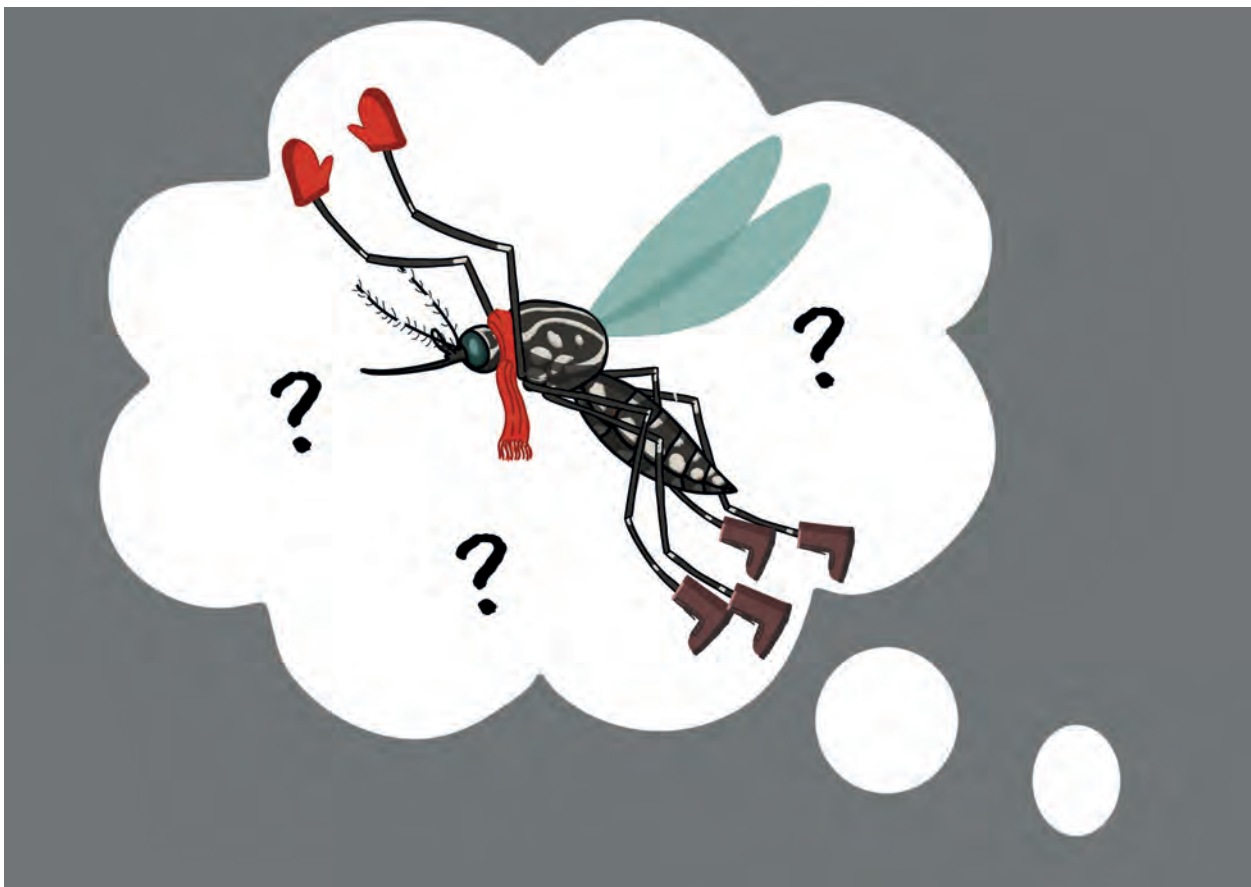


Figura 4. El *Aedes aegypti* en regiones templadas.

predecirse que el contacto secundario entre las formas podría resultar en un incremento en los casos de dengue en la zona y complicar las estrategias de control.

Más allá de las zonas de contacto secundario, preocupa el hecho de que el *Ae. aegypti* continúa su expansión mundial. El *Ae. aegypti*, por lo general considerado un mosquito de climas cálidos, típico de las regiones tropicales y subtropicales del mundo, en donde las temperaturas promedio en invierno están por encima de los 10 °C, ha alcanzado regiones más frías en las últimas décadas y ha llegado a establecerse también ahí. Recientemente, el *Ae. aegypti* se ha reportado en zonas templadas de los Estados Unidos, incluyendo ciudades de Utah, Colorado, Virginia, el Distrito de Columbia y el norte de California. En principio, la intuición y experiencia nos dicen que este mosquito tropical no debería sobrevivir en bajas temperaturas. Pero la historia del *Ae. aegypti*

ha demostrado que se trata de una especie con gran capacidad de adaptación y es posible que haya encontrado la forma de hacer frente al estrés de los climas fríos, ya sea a través de cambios fisiológicos o de comportamiento, quizá explotando su asociación cercana con las personas y refugiándose con ellas. La llegada del *Ae. aegypti* a climas templados sin duda pone en riesgo a un porcentaje importante de la población mundial que no ha estado expuesta al dengue y otros patógenos transmitidos por el mosquito, y que son, por tanto, susceptibles a la enfermedad.

Conclusiones

La historia reciente del *Ae. aegypti* está ligada a las poblaciones humanas. El mosquito tiene una gran capacidad de adaptación y flexibilidad en su historia de vida, lo que le permite responder rápidamente a los cambios del ambiente. Hace más de medio siglo,

el *proto-aegypti* llegó a América con los viajes de descubrimiento europeo y fue en América en donde completó su domesticación y se volvió el mosquito transmisor del dengue urbano por excelencia. Desde América, la forma invasiva del *Ae. aegypti* continuó su expansión global, siempre asociado a los movimientos y asentamientos humanos. La comprensión de los factores ecológicos que han llevado al *Ae. aegypti* a adaptarse a las poblaciones humanas y sus diferentes ambientes nos permite predecir el impacto que tendrán los cambios en el uso de suelo y el clima a consecuencia de la actividad humana, ayudándonos a encontrar respuestas adecuadas. Entender la historia evolutiva y la dinámica poblacional del *Ae. aegypti* puede contribuir a su control.

Andrea Gloria-Soria

Center for Vector Biology & Zoonotic Diseases, Department of Entomology, The Connecticut Agricultural Experiment Station, EUA.
Andrea.Gloria-Soria@ct.gov

Jacquelyn C. LaReau

Department of Environmental Sciences, The Connecticut Agricultural Experiment Station, EUA.
Jacquelyn.LaReau@ct.gov

Lecturas recomendadas

- Crawford, J. E., D. Balcazar, S. Redmond, N. H. Rose, H. A. Youd *et al.* (2025), “1206 genomes reveal origin and movement of *Aedes aegypti* driving increased dengue risk”, *Science*, 389(6766):p.eads3732.
- LaReau, J. C. y A. Gloria-Soria (2025), “*Aedes aegypti* (Yellow fever mosquito)”, *Trends in Parasitology*, 41(5):418-419.
- Powell, J. R., A. Gloria-Soria y P. Kotsakiozi (2018), “Recent history of *Aedes aegypti*: vector genomics and epidemiology records”, *Bioscience*, 68(11): 854-860.
- Soghigian, J., A. Gloria-Soria, V. Robert, G. Le Goff, A. B. Failloux y J. R. Powell (2020), “Genetic evidence for the origin of *Aedes aegypti*, the yellow fever mosquito, in the southwestern Indian Ocean”, *Molecular Ecology*, 29(19):3593-3606.
- Wilkerson, R. C., Y.-M. Linton y D. Strickman (2021), *Mosquitoes of the World*, Baltimore, Johns Hopkins University Press.

Adriana E. Flores-Suárez y Selene M. Gutiérrez-Rodríguez

Cuando los insecticidas dejan de funcionar: el control de los mosquitos en riesgo

Resumen

El control químico ha sido una herramienta importante para reducir la transmisión de dengue, zika y chikungunya. Sin embargo, el uso repetido de insecticidas favorece la aparición de resistencia y reduce su eficacia. Comprender este proceso adaptativo es clave para promover estrategias integradas y sostenibles que fortalezcan el control vectorial y protejan la salud pública.

Abstract

Chemical control has been a key tool in reducing the transmission of dengue, Zika, and chikungunya. However, repeated insecticide use promotes resistance and diminishes its effectiveness. Understanding this adaptive process is essential to advance integrated and sustainable strategies that strengthen vector control and protect public health.

Durante décadas, el control de mosquitos ha sido una de las principales estrategias para reducir la transmisión de enfermedades como el dengue, zika y chikungunya. En muchas regiones del mundo, y particularmente en América Latina, estas enfermedades representan un problema persistente de salud pública debido a la amplia distribución de los mosquitos vectores y a su estrecha relación con los entornos urbanos y domésticos (**Figura 1**). Frente a este escenario, los insecticidas se consolidaron como una herramienta rápida y eficaz para disminuir las poblaciones de mosquitos y reducir el riesgo de transmisión.

El uso de insecticidas ofreció, durante mucho tiempo, resultados visibles. La aplicación de larvicidas permitió controlar el desarrollo de los mosquitos en recipientes con agua, mientras que los adulticidas se emplearon para reducir de manera inmediata las poblaciones adultas durante brotes epidémicos (**Figura 2**). Estas intervenciones químicas se integraron a los programas de control vectorial y se convir-





Figura 1. El mosquito en el entorno doméstico. Los mosquitos vectores se desarrollan en recipientes con agua presentes dentro y alrededor de las viviendas, lo que favorece su cercanía con la población humana y dificulta su control en entornos urbanos y periurbanos. Ilustración creada con BioRender.

tieron en una respuesta habitual ante el aumento de casos, reforzando la percepción de que los insecticidas eran la solución principal para enfrentar el problema.

Sin embargo, el éxito inicial del control químico también trajo consigo una fuerte dependencia de estas herramientas. En muchos contextos, el control de

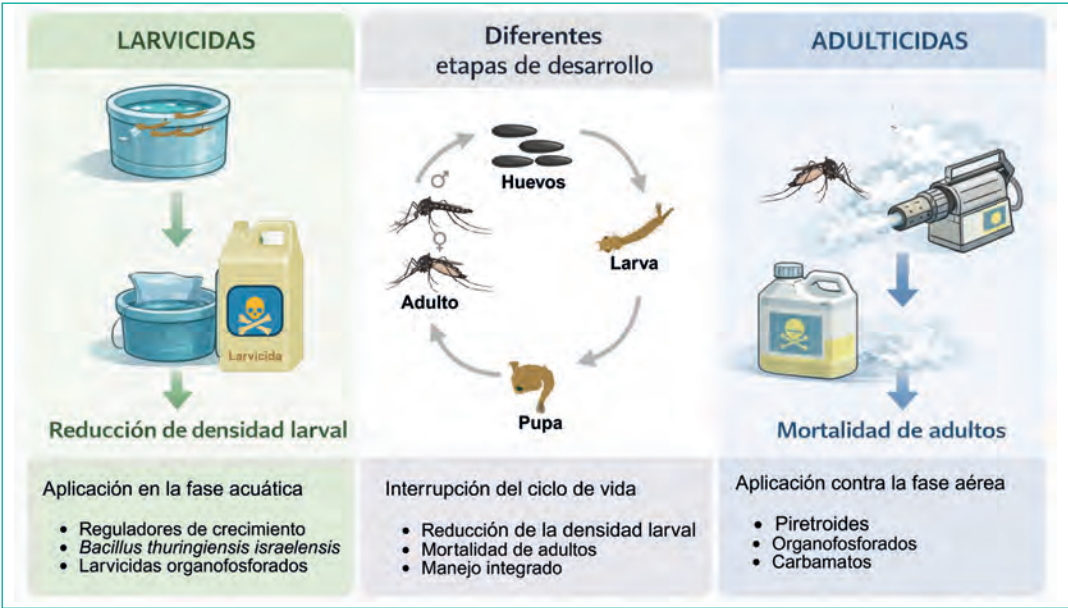


Figura 2. El uso de insecticidas en el control de mosquitos. El control químico se basa en la aplicación de larvicidas y adulticidas para reducir las poblaciones de mosquitos en sus diferentes etapas de desarrollo, una estrategia ampliamente utilizada en los programas de control vectorial. Ilustración creada con BioRender.

mosquitos se apoyó casi exclusivamente en la aplicación repetida de insecticidas, dejando en segundo plano otras medidas preventivas. Con el tiempo, esta estrategia comenzó a mostrar señales de desgaste: los tratamientos parecían menos efectivos y los mosquitos reaparecían con mayor rapidez tras cada aplicación.

Este fenómeno no ocurrió de manera repentina ni fue el resultado de fallas aisladas en la aplicación de insecticidas. Por el contrario, está relacionado con un proceso biológico natural que ocurre en todas las poblaciones de organismos vivos: la capacidad de adaptarse a las condiciones del entorno. En el caso de los mosquitos, la exposición constante a insecticidas favoreció la supervivencia de los individuos capaces de tolerar sus efectos, lo que dio lugar a poblaciones cada vez más difíciles de controlar.

La resistencia a los insecticidas se ha convertido en uno de los principales retos para los programas de control vectorial. Su aparición compromete la eficacia de las estrategias tradicionales y obliga a replantear la forma en que se enfrentan las enfermedades transmitidas por mosquitos. Comprender cómo surge este fenómeno y cuáles son sus implicaciones resulta fundamental para avanzar hacia enfoques más sostenibles y efectivos para la protección de la salud pública.

■ ¿Qué es la resistencia a los insecticidas y cómo se desarrolla?

■ A primera vista, los mosquitos parecen organismos simples y homogéneos. Sin embargo, como ocurre en cualquier población de seres vivos, existen diferencias naturales entre los individuos. Estas variaciones, aunque pequeñas, pueden marcar una gran diferencia cuando los mosquitos se enfrentan repetidamente a la misma presión externa, como la exposición a un insecticida.

Cuando se aplica un insecticida, la mayoría de los mosquitos susceptibles muere, pero algunos individuos logran sobrevivir. Esta supervivencia no ocurre por azar ni porque el mosquito “aprenda” a resistir, sino porque ya posee características biológicas que le permiten tolerar mejor el efecto de la sustancia. Al reproducirse, estos mosquitos transmiten dichas características a su descendencia, lo que provoca que, con el tiempo, aumente la proporción de individuos resistentes en la población (**Figura 3**).

Este proceso es comparable con el que ocurre con el uso repetido de antibióticos en bacterias. Al inicio, el tratamiento es eficaz, pero si se utiliza de forma constante y sin cambios, las bacterias resistentes sobreviven y se multiplican. De manera similar, en el caso de los mosquitos, la aplicación continua de



Figura 3. Desarrollo de la resistencia a insecticidas en poblaciones de mosquitos. La aplicación repetida de insecticidas favorece la supervivencia de individuos con mayor tolerancia, que transmiten esta capacidad a su descendencia, dando lugar, con el tiempo, a poblaciones mayoritariamente resistentes y difíciles de controlar. Ilustración creada con BioRender.



insecticidas selecciona a los individuos capaces de soportar la exposición, lo que hace que el producto pierda progresivamente su eficacia.

Existen distintos mecanismos mediante los cuales los mosquitos pueden desarrollar resistencia. En algunos casos, su organismo es capaz de descomponer o eliminar el insecticida antes de que cause daño; en otros, el sitio donde actúa la sustancia deja de responder de la misma manera. Aunque estos procesos son complejos a nivel biológico, su consecuencia es sencilla: el insecticida ya no cumple su función de control.

La velocidad con la que se desarrolla la resistencia depende de varios factores. Entre ellos se encuentran la frecuencia de uso del insecticida, la duración de su aplicación y el uso repetido de productos con mecanismos de acción similares. Cuando estas condiciones se combinan, la presión de selección se intensifica y la resistencia puede manifestarse en periodos relativamente cortos.

Es importante resaltar que la resistencia no es una falla exclusiva de los programas de control ni una característica “anormal” de los mosquitos. Se trata

de una respuesta adaptativa predecible ante el uso intensivo de insecticidas. Reconocer este proceso permite comprender por qué confiar únicamente en el control químico resulta insuficiente y por qué es necesario replantear las estrategias de control vectorial a largo plazo.

¿Por qué la resistencia a insecticidas es un problema de salud pública?

La resistencia a los insecticidas no es sólo un concepto técnico, ni un problema limitado a los laboratorios de investigación. Sus efectos se reflejan directamente en la vida cotidiana de las personas y en la capacidad de los sistemas de salud para prevenir brotes de enfermedades transmitidas por mosquitos. Cuando las poblaciones de vectores dejan de responder a las estrategias de control químico, el riesgo de transmisión aumenta, incluso en contextos donde las acciones de control continúan aplicándose de manera regular.

En muchas ciudades, el problema se vuelve evidente durante la temporada de lluvias. A pesar de



las campañas de control y de la aplicación de insecticidas, los mosquitos reaparecen en poco tiempo alrededor de las viviendas. Desde la perspectiva de la población, esta situación suele generar desconcierto y desconfianza: se fumiga, pero los mosquitos siguen presentes. Esta situación no sólo afecta la credibilidad de las acciones de control, sino que también dificulta la participación comunitaria en las medidas preventivas.

Desde el punto de vista operativo, la resistencia obliga a intensificar las intervenciones. Se incrementa la frecuencia de las aplicaciones, se amplían las áreas tratadas o se recurre a distintos productos para recuperar la eficacia perdida. Estas acciones demandan mayores recursos humanos y económicos que no siempre se traducen en una reducción significativa de las poblaciones de mosquitos. En sistemas de salud con presupuestos limitados, este escenario representa una carga adicional difícil de asumir.

Otro aspecto relevante es que el uso continuo de insecticidas frente a poblaciones resistentes puede generar una falsa sensación de control. Aunque las actividades se mantienen y los esfuerzos son visibles,

el impacto real sobre la densidad del vector puede ser mínimo. Esto complica la evaluación de las estrategias implementadas y limita la capacidad de respuesta ante un aumento repentino de casos, especialmente en zonas densamente pobladas.

La resistencia también afecta la planificación del control vectorial a mediano y largo plazo. Sin información actualizada sobre la susceptibilidad de las poblaciones locales de mosquitos, resulta complicado seleccionar las herramientas más adecuadas, o decidir cuándo es necesario modificar las estrategias. En este sentido, la resistencia a los insecticidas no sólo es un fenómeno biológico, sino también un reto que involucra la gestión, la vigilancia y las políticas públicas orientadas a proteger la salud de la población.

¿Qué se puede hacer cuando los insecticidas ya no bastan?

■ Aceptar que los insecticidas tienen límites no implica dejar de utilizarlos, sino integrarlos de manera más estratégica en el control vectorial. Frente al problema de la resistencia, una de las acciones más im-

Vigilancia entomológica
Es el monitoreo sistemático de la presencia, abundancia, distribución y comportamiento de los insectos vectores de enfermedades en un lugar determinado.

portantes es la **vigilancia entomológica**, que permite conocer cómo responden las poblaciones locales de mosquitos a los insecticidas disponibles. Contar con esta información evita el uso innecesario de productos que ya no son eficaces y ayuda a tomar decisiones basadas en evidencia, en lugar de repetir esquemas que han perdido efectividad.

La vigilancia también cumple una función preventiva. Al detectar de manera temprana cambios en la susceptibilidad de los mosquitos, es posible ajustar las estrategias antes de que la resistencia se generalice. Esto permite planificar mejor las intervenciones y reducir el impacto negativo de aplicaciones repetidas que sólo incrementan la presión de selección sobre las poblaciones vectoriales.

Otra estrategia es el manejo integrado de vectores, que propone combinar distintas acciones en lugar de depender exclusivamente del control químico (**Figura 4**). Este enfoque incluye medidas am-

bientales como la eliminación de criaderos, el manejo adecuado del agua almacenada y la reducción de objetos que puedan acumular agua alrededor de las viviendas. Estas acciones, aunque simples, tienen un impacto directo en la reducción de la población de mosquitos y disminuyen la necesidad de recurrir constantemente a los insecticidas.

El control químico, cuando se utiliza como parte del manejo integrado, adquiere un papel más específico y focalizado. En lugar de aplicarse de forma sistemática, los insecticidas se emplean en momentos y lugares donde realmente son necesarios; por ejemplo, ante un aumento de casos o en zonas con alta densidad vectorial. Este uso racional contribuye a prolongar la vida útil de los insecticidas disponibles y a retrasar la aparición de resistencia.

La participación de la comunidad es otro componente clave del control de mosquitos. Muchas de las especies que transmiten enfermedades se reprodu-

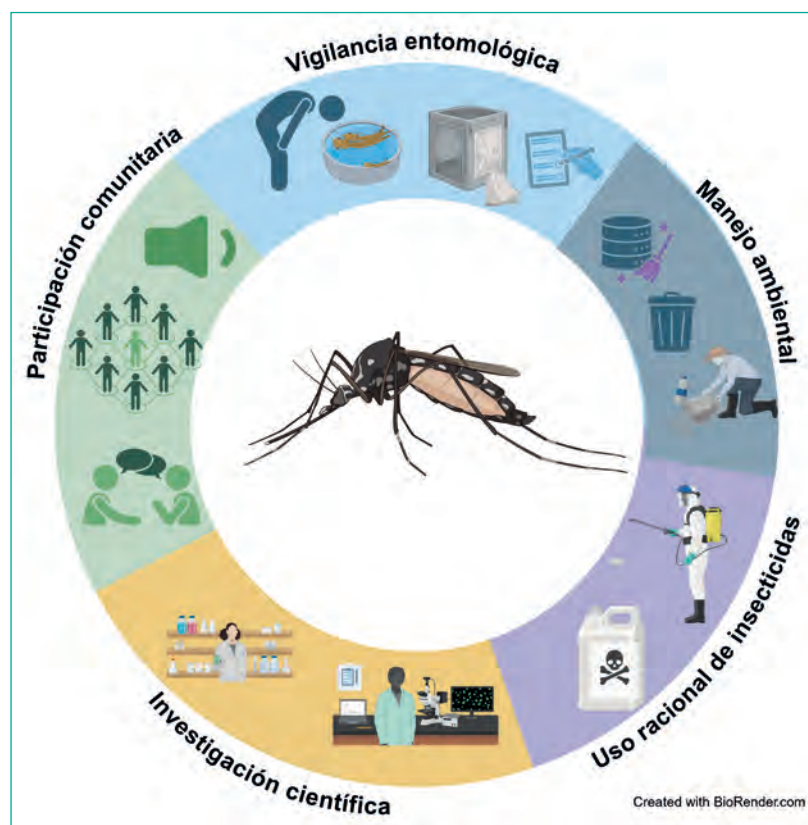


Figura 4. Manejo integrado para el control de mosquitos. El control vectorial sostenible combina la vigilancia entomológica, el manejo ambiental, el uso racional de insecticidas, la participación comunitaria y la investigación científica, para reducir así la dependencia exclusiva del control químico. Ilustración creada con BioRender.

cen en recipientes domésticos, por lo que las acciones cotidianas en las viviendas y sus alrededores son determinantes. Informar a la población sobre cómo se reproduce el mosquito y qué prácticas favorecen su presencia permite transformar a las personas en actores activos del control vectorial, en lugar de depender únicamente de intervenciones externas.

Finalmente, la investigación científica continúa aportando nuevas herramientas y enfoques para enfrentar la resistencia a los insecticidas. El desarrollo de productos con mecanismos de acción distintos, así como de estrategias basadas en la biología del mosquito, abre nuevas posibilidades para diversificar el control vectorial. Sin embargo, estas alternativas también requieren utilizarse con cautela y dentro de esquemas integrales para evitar que el problema de la resistencia se repita.

Reflexiones finales

■ La resistencia a los insecticidas es el resultado de un proceso biológico natural acelerado por el uso intensivo y continuo de estas herramientas de control. Aunque los insecticidas han sido y siguen siendo un componente importante del control de mosquitos, confiar exclusivamente en ellos ha demostrado ser insuficiente para enfrentar de manera sostenida las enfermedades transmitidas por vectores.

Comprender por qué los insecticidas dejan de funcionar permite reconocer que el control de mosquitos es un desafío complejo, que no puede resolverse con una sola estrategia. La combinación de vigilancia, manejo integrado, participación comunitaria y generación de conocimiento científico constituye la base para avanzar hacia un control vectorial más efectivo y duradero.

Frente a un escenario en el que los mosquitos continúan adaptándose, la clave no está en buscar soluciones inmediatas, sino en construir estrategias flexibles y basadas en evidencia. Sólo así será posible reducir el impacto de la resistencia a los insecticidas y proteger de manera más eficaz la salud de las poblaciones expuestas a enfermedades transmitidas por mosquitos.

Adriana E. Flores-Suárez

Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León.

adriana.floressr@uanl.edu.mx

Selene M. Gutiérrez-Rodríguez

Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León.

selene.gutierrezrdr@uanl.edu.mx

Referencias específicas

- Berg, H. van den, H. S. da Silva Bezerra, S. Al-Eryani, E. Chanda, B. N. Nagpal *et al.* (2021), "Recent trends in global insecticide use for disease vector control and potential implications for resistance management", *Scientific Reports*, 11:23867.
- OPS (2019), "Estrategia de gestión integrada para la prevención y el control de las enfermedades arbovirales en las Américas", Organización Panamericana de la Salud [en línea]. Disponible en: <https://iris.paho.org/items/c53dcf8e-b18b-4df7-aea7-dbe05cef2ebf>, consultado el 29 de abril de 2026.
- Ranson, H. y N. Lissenden (2016), "Insecticide resistance in African Anopheles mosquitoes: A worsening situation that needs urgent action to maintain malaria control", *Trends in Parasitology*, 32(3):187-196.
- Rivero, A., J. Vézilier, M. Weill, A. F. Read y S. Gandon (2010), "Insecticide control of vector-borne diseases: when is insecticide resistance a problem?", *PLoS Pathogens*, 6(8):e1001000.
- WHO (2017), "Global vector control response 2017-2030", World Health Organization [en línea]. Disponible en: <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/68d92417-dd44-437d-bb8b-2befb7bdc732/content>, consultado el 29 de abril de 2026.

Pablo Manrique-Saide, Abdiel Martín-Park, Azael Che-Mendoza y Jorge Alfredo Palacio Vargas

“Mosquitos buenos” con *Wolbachia* para combatir el dengue en Yucatán

Resumen

El concepto de “mosquitos buenos” hablando de *Aedes aegypti* portadores de la bacteria *Wolbachia* sintetiza su doble contribución: reducción de poblaciones vectoriales y menor capacidad de transmitir el virus bajo determinados esquemas operativos. La Estrategia *Aedes-Wolbachia* en Mérida, Yucatán —que forma parte de la Estrategia Nacional para el Control del Dengue y Otras Arbovirosis— combina el control vectorial tradicional con el reemplazo poblacional mediante la siembra de cápsulas con huevos de mosquitos buenos, con la finalidad de reducir la transmisión del dengue. En este artículo se describen sus bases biológicas, la evidencia científica y la colaboración academia-sector salud que sustenta su implementación programática.

Abstract

The concept of “good mosquitoes” for *Aedes aegypti* carrying the bacterium *Wolbachia* summarizes their dual contribution: reduction of vector populations and decreased capacity to transmit viruses under specific operational schemes. The *Aedes-Wolbachia* Strategy in Mérida, Yucatán —integrated into the National Strategy for the Control of Dengue and Other Arboviral Diseases— combines traditional vector control with population replacement through the deployment of capsules containing eggs of “good mosquitoes”, with the aim of reducing dengue transmission. This article describes its biological foundations, supporting scientific evidence, and the collaboration between academia and the health sector that underpin its programmatic implementation.

El dengue y los límites del control tradicional

El dengue, junto con la chikungunya y el zika, continúa siendo un problema prioritario de salud pública en México. Estas arbovirosis afectan principalmente zonas urbanas de climas tropicales, donde el mosquito *Aedes aegypti*



encuentra condiciones óptimas para reproducirse en recipientes domésticos y peridomésticos, y mantiene así un contacto estrecho con la población humana, lo que favorece la transmisión persistente y la ocurrencia de brotes recurrentes.

En ausencia de tratamientos antivirales específicos y con opciones de vacunación limitadas, la prevención del dengue sigue dependiendo en gran medida del control del vector. Las acciones tradicionales –control químico de adultos-larvas y manejo de criaderos– siguen siendo indispensables, especialmente el uso de adulticidas para la mitigación de brotes. Sin embargo, cuando se aplican de forma predominantemente reactiva o sin continuidad territorial, sus efectos suelen ser limitados y de corta duración.

Ante este panorama, se ha impulsado la incorporación de herramientas complementarias e innovadoras dentro del manejo integrado del *Aedes aegypti* (OPS, 2019), como una estrategia que reconoce que ninguna intervención aislada es suficiente y que la sostenibilidad requiere la integración ordenada de múltiples tácticas bajo la rectoría del sector salud.

La estrategia *Aedes-Wolbachia*: de la reducción del mosquito al reemplazo poblacional

La estrategia *Aedes-Wolbachia* es una intervención biológica diseñada para reducir la capacidad del mosquito *Aedes aegypti* para transmitir virus como el del dengue, zika y chikungunya, sin buscar la eliminación del vector del ambiente. Su objetivo central es disminuir de manera sostenida la transmisión del dengue y otras arbovirosis urbanas, complementando de manera efectiva las acciones tradicionales de control vectorial (OPS, 2019).

A diferencia de los enfoques clásicos, centrados en la reducción de la abundancia del mosquito, esta estrategia adopta el concepto de *reemplazo o sustitución poblacional*. En lugar de eliminar al vector, se busca reemplazar o sustituir progresivamente las poblaciones silvestres altamente competentes para la transmisión viral con poblaciones que tienen una menor capacidad de transmitir el virus, debido a la presencia de la bacteria *Wolbachia*.

En México, la estrategia *Aedes-Wolbachia* se incorpora como línea de acción dentro de la Estrategia Nacional para el Control del Dengue y Otras Arbovirosis 2025-2030 (Cenaprece, 2025), bajo la rectoría del sector salud. En Yucatán, su implementación cuenta con el respaldo técnico y científico del Laboratorio para el Control Biológico de *Aedes aegypti* de la Universidad Autónoma de Yucatán (LCB-UADY) (UADY, 2025).

¿Por qué se habla de “mosquitos buenos”?

 *Wolbachia* es una bacteria **endosimbionte** presente de forma natural en numerosos insectos, aunque no en el *Aedes aegypti*. Cuando se introduce y se establece en esta especie, ocurre un cambio funcional clave (escudo biológico): el virus del dengue tiene grandes dificultades para multiplicarse dentro del mosquito.

El mosquito sigue siendo el mismo –no deja de picar ni desaparece–, pero su capacidad para transmitir el virus se reduce de forma importante. Por esta razón, en la divulgación científica y en la comunicación con la comunidad se ha adoptado el término “mosquitos buenos” (Martín-Park y cols., 2024), para referirse a mosquitos que, aunque presentes en el ambiente, representan un menor riesgo epidemiológico (**Figura 1**).

Cuando hablamos de “mosquitos buenos”, nos referimos también a una estrategia para frenar su reproducción (supresión poblacional). Al liberar machos que portan la bacteria *Wolbachia*, éstos actúan como un control natural: cuando se aparean con las hembras silvestres, los huevos no llegan a nacer. Es una forma de reducir la población de mosquitos de manera dirigida, cerrándole el paso a las enfermedades que transmiten.

Mecanismos biológicos que sustentan el reemplazo poblacional

 La efectividad de la estrategia *Aedes-Wolbachia* se basa en tres mecanismos biológicos complementarios:

1. **La transmisión materna.** Las hembras portadoras de *Wolbachia* transmiten la bacteria a toda su descen-

Endosimbionte

Organismo muy pequeño que vive dentro de otro ser vivo (llamado hospedero) de forma que ambos se benefician. Por ejemplo, algunas bacterias viven dentro de insectos o animales que les ayudan a obtener nutrientes, defenderse de enfermedades o sobrevivir en ciertas condiciones.



Figura 1. Infografías “Mosquitos buenos”. Ejemplo de materiales usados para la comunicación social de la Estrategia *Aedes-Wolbachia* en Yucatán.

- dencia a través de los huevos, lo que permite que su presencia persista generación tras generación.
2. **La incompatibilidad citoplasmática.** Los cruces entre machos con *Wolbachia* y hembras sin la bacteria producen huevos inviables, mientras que las hembras portadoras sí generan descendencia viable. Este fenómeno confiere una ventaja reproductiva que favorece la expansión progresiva de *Wolbachia* en la población del mosquito.
 3. **El bloqueo de la transmisión viral.** La bacteria *Wolbachia* interfiere con la replicación del virus del dengue dentro del mosquito, reduciendo la carga viral y la probabilidad de transmisión durante la picadura. Conforme aumenta la proporción de mosquitos con *Wolbachia*, disminuye el riesgo de transmisión a nivel comunitario.

La combinación de estos mecanismos explica por qué *Wolbachia* puede operar simultáneamente como herramienta de reemplazo y de supresión dentro de programas integrados (Figura 2).

Evidencia científica

La efectividad del reemplazo poblacional del *Aedes aegypti* con *Wolbachia* ha sido documentada en distintos contextos epidemiológicos. Uno de los estudios más sólidos proviene de Yogyakarta, Indonesia

(Utarini y cols., 2021), donde un ensayo controlado aleatorizado mostró una reducción cercana al 77 % en la incidencia de dengue, acompañada de una disminución aún mayor en hospitalizaciones en las zonas intervenidas frente a aquellas sin mosquitos con *Wolbachia*. Desde 2017, el Ministerio de Salud

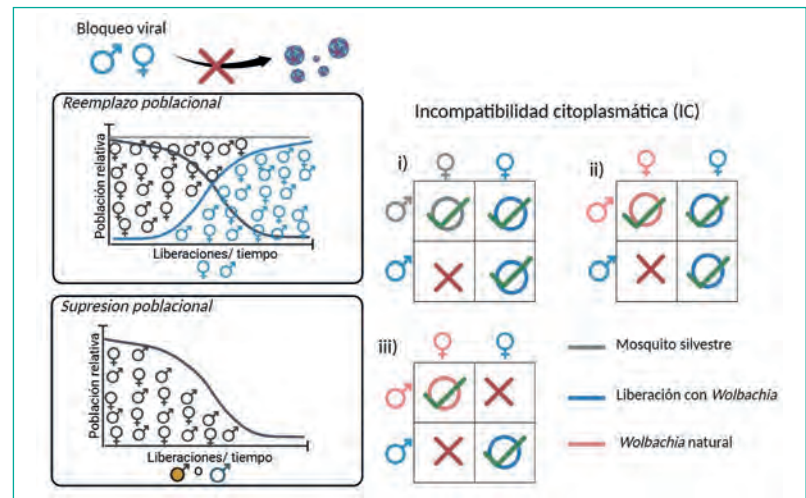


Figura 2. Esquema de las estrategias de control del *Aedes aegypti* basadas en *Wolbachia*. Se ilustran dos enfoques principales: reemplazo poblacional, donde la liberación sostenida de mosquitos con *Wolbachia* permite la invasión y establecimiento de esta bacteria en la población silvestre mediante su transmisión materna, destacando el efecto de bloqueo viral asociado a *Wolbachia*, que reduce la capacidad de transmisión de arbovirus; asimismo, supresión poblacional, donde la liberación de machos (portadores de *Wolbachia*) reduce la población al generar cruces incompatibles (incompatibilidad citoplasmática, IC) que impiden la eclosión de huevos. A la derecha se muestran los distintos escenarios de IC según el estatus de infección (mosquito silvestre, liberado con *Wolbachia* o con infección natural), indicando los cruces compatibles e incompatibles. Imagen cortesía de Yamili Contretas Perera.

de Malasia ha implementado liberaciones de *Aedes aegypti* con la cepa *wAlbB*, observándose reducciones promedio cercanas al 60 % en casos de dengue en sitios intervenidos, con mayor impacto conforme la bacteria se establece en la población de mosquitos (Hoffmann y cols., 2024).

En conjunto, estos hallazgos –derivados tanto de ensayos controlados como de implementaciones programáticas a gran escala– refuerzan la consistencia del enfoque. A partir de esta evidencia acumulada, la Organización Mundial de la Salud reconoce el reemplazo poblacional del *Aedes aegypti* con *Wolbachia* como una intervención segura, eficaz y escalable, particularmente cuando forma parte de estrategias

de manejo integral del vector y no como sustituto de las acciones convencionales (ors, 2019).

¿Cómo se implementa la estrategia en Mérida?

En Mérida, la estrategia se implementa mediante la siembra dirigida de cápsulas con huevos de *Aedes aegypti* portadores de *Wolbachia* (Figura 3). Se colocan (siembran) las cápsulas en unidades diseminadoras (UD) usando como guía la red de ovitrampas existente (González-Acosta, 2020). Una ovitrampa es un dispositivo utilizado en vigilancia entomológica para monitorear la presencia y abundancia de *Ae. aegypti*. Es un recipiente (generalmente negro) con



Figura 3. Elaboración y presentación de cápsulas con huevos de *Aedes aegypti* portadores de *Wolbachia* para reemplazo poblacional.



Figura 4. Implementación de estrategia de reemplazo mediante el uso de cápsulas con huevos de *Aedes aegypti* portadores de *Wolbachia*. Personal técnico de las brigadas de vigilancia entomológica con ovitrampas distribuye las cápsulas en las UD. Esta estrategia, basada en usar la red de ovitrampas para definir los puntos de liberación, facilita la liberación para promover el reemplazo poblacional y el bloqueo de la transmisión de arbovirus.

agua, que contiene un sustrato interno (papeleta), usado por las hembras de *Ae. aegypti* para depositar sus huevos (oviposición). El personal de la Secretaría de Salud revisa semanalmente las ovitrampas y el número de huevos se usa para estimar la densidad poblacional del mosquito. La UD es un recipiente de las mismas características que la ovitrampa, pero sin papeleta, y se usa únicamente para la siembra de las cápsulas.

Para la siembra de las cápsulas se emplea una UD por cada ovitrampa activa en las **áreas prioritarias** para el programa (Figura 4).

Al entrar en contacto con el agua, las cápsulas se disuelven y los huevos eclosionan, dando origen a mosquitos portadores de *Wolbachia*. Este método permite una introducción gradual, estandarizada y segura de la bacteria, sin liberar directamente mosquitos adultos y facilitando la integración con las actividades rutinarias del programa de control vectorial.

La siembra de cápsulas en UD, pareadas con ovitrampas activas, permite aprovechar la infraestructura existente del Programa de Control de Vectores, en particular la red de ovitrampas, los procedimientos rutinarios de visita, revisión y registro en predios, la aceptación comunitaria previamente construida, así como los sistemas habituales de georreferenciación y registro. En conjunto, estos elementos posibilitan una ejecución estandarizada, trazable y plenamente integrada a las actividades regulares del programa.

De la supresión poblacional a una estrategia sostenible

Las primeras experiencias con *Wolbachia* en Yucatán se realizaron bajo esquemas de *supresión poblacional* (Martín-Park y cols., 2022), lo que permitió desarrollar capacidades técnicas, logísticas y de vigilancia entomológica. Estos aprendizajes fueron

Áreas prioritarias

Mejor conocidas como *hotspots*, término que se utiliza para aludir a áreas geográficas delimitadas mediante análisis epidemiológicos que presentan transmisión sostenida de dengue, chikungunya y zika, y un riesgo elevado de brotes o patrones específicos de transmisión que justifican intervenciones focalizadas.

fundamentales para identificar los retos operativos y sociales de la intervención.

Con base en esta experiencia y en la evidencia internacional disponible, se decidió transitar hacia el *reemplazo poblacional* como eje central de la estrategia *Aedes-Wolbachia*, integrándola de manera formal al Programa de Control de Vectores de los Servicios de Salud de Yucatán.

Producción local, colaboración y perspectivas

La estrategia *Aedes-Wolbachia* en Mérida representa una experiencia institucional inédita al integrarse formalmente a un programa público de control vectorial bajo liderazgo del sector salud y con respaldo académico. Este modelo ha permitido evolucionar de una intervención piloto a una herramienta programática con potencial de expansión hacia localidades prio-

ritarias de Yucatán, la península y otras regiones del país.

Un elemento central de la estrategia es el Laboratorio para el Control Biológico de *Aedes aegypti* de la Universidad Autónoma de Yucatán (LCB-UADY), una infraestructura pública sin fines de lucro que produce las cápsulas con huevos de mosquitos portadores de *Wolbachia*, realiza control de calidad entomológico y molecular y brinda soporte técnico continuo al programa. Esta capacidad fortalece la autonomía operativa y la sostenibilidad de la intervención. El laboratorio constituye una plataforma singular en México, Centroamérica y el Caribe, con capacidad para producir semanalmente millones de mosquitos y cerca de 15 millones de huevos con *Wolbachia*, destinados a estrategias de reemplazo poblacional con baja competencia vectorial para dengue, zika y chikungunya.



La proyección internacional del modelo se evidenció en enero de 2026 con la transferencia tecnológica y donación de material biológico a Cuba (ops, 2026), acompañada de capacitación técnica para su implementación. Esta cooperación Sur-Sur refleja el valor de la ciencia pública como bien compartido para fortalecer la respuesta regional frente al dengue y otras arbovirosis. En conjunto, la experiencia mexicana muestra que la innovación en control vectorial no depende únicamente de nuevas tecnologías, sino de la articulación entre investigación, políticas públicas y colaboración internacional. En ese sentido, los “mosquitos buenos” representan más que una intervención biológica: simbolizan una nueva forma de enfrentar enfermedades transmitidas por vectores mediante soluciones sostenibles, basadas en evidencia y construidas desde lo local hacia lo global.

Pablo Manrique-Saide

Universidad Autónoma de Yucatán.

pablo_manrique2000@hotmail.com

Abdiel Martín-Park

Universidad Autónoma de Yucatán.

ampark27@gmail.com

Azael Che-Mendoza

Universidad Autónoma de Yucatán y Servicios de Salud de Yucatán.

achemendoza@gmail.com

Jorge Alfredo Palacio Vargas

Servicios de Salud de Yucatán.

etv_yuc@ssy.gob.mx

Referencias específicas

- Cenaprece (2025), “Estrategia Nacional para el Control del Dengue y Otras Arbovirosis 2025-2030”, Centro Nacional de Programas Preventivos y Control de Enfermedades [en línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/salud/cenaprece/documentos/estrategia-nacional-para-el-control-del-dengue-y-otras-arbovirosis-2025-2030>, consultado el 6 de mayo de 2026.
- González-Acosta, C., J. Cime-Castillo y F. Correa-Morales (2020), “Control integrado de vectores en México”, *Ciencia*, 71(1):52-63.
- Hoffmann, A. A., N. W. Ahmad, W. M. Keong, C. Y. Ling, N. A. Ahmad *et al.* (2024), “Introduction of *Aedes aegypti* mosquitoes carrying *wAlbB Wolbachia* sharply decreases dengue incidence in disease hotspots”, *iScience*, 27(2):108942. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.108942>.
- Martín-Park, A., A. Che-Mendoza, Y. Contreras-Perera, S. Pérez-Carrillo, H. Puerta-Guardo *et al.* (2022), “Pilot trial using mass field-releases of sterile males produced with the incompatible and sterile insect techniques as part of integrated *Aedes aegypti* control in Mexico”, *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 16(4):e0010324. Disponible en: <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0010324>.
- Martín-Park, A., Y. Contreras-Perera, A. Che-Mendoza, S. Pérez-Carrillo, N. Pavía-Ruz *et al.* (2024), “Recommendations for implementing innovative technologies to control *Aedes aegypti*: Population suppression using a combination of the incompatible and sterile insect techniques (IIT-SIT), based on the Mexican experience/initiative”, *Insects*, 15(12):987. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/insects15120987>.
- ops (2019), *Evaluación de las estrategias innovadoras para el control de Aedes aegypti: desafíos para su introducción y evaluación del impacto*, Washington, Organización Panamericana de la Salud. Disponible en: <https://doi.org/10.37774/9789275320969>.
- ops (2026), “México y Cuba fortalecen cooperación bilateral, ops acompaña los esfuerzos para el control del *Aedes aegypti*”, Organización Panamericana de la Salud [en línea]. Disponible en: <https://www.paho.org/es/noticias/3-2-2026-mexico-cuba-fortalecen-cooperacion-bilateral-ops-acompana-esfuerzos-para-control>, consultado el 6 de mayo de 2026.
- UADY (2025), “Implementan el control biológico del *Aedes aegypti* ‘Mosquitos buenos con *Wolbachia*”, Universidad Autónoma de Yucatán [en línea]. Disponible en: <https://ccba.uady.mx/noticias/url/mosquitobueno>, consultado el 6 de mayo de 2026.
- Utarini, A., C. Indriani, R. A. Ahmad, W. Tantowijoyo, E. Arguni *et al.* (2021), “Efficacy of *Wolbachia*-infected mosquito deployments for the control of dengue”, *The New England Journal of Medicine*, 384(23): 2177-2186. Disponible en: <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2030243>.

Felipe A. Dzúl-Manzanilla y Héctor Gómez-Dantés

Manejo integrado de *Aedes* en México

Resumen

El dengue, la chikungunya y el zika son enfermedades transmitidas por la picadura de los mosquitos hembra del género *Aedes*. Durante años el dengue se asoció con climas tropicales, pero hoy esto está cambiando. En México se ha comprobado que el mosquito ha logrado adaptarse y expandirse en ciudades y grandes centros urbanos del país con climas templados donde antes no se presentaban estas enfermedades. Esta expansión geográfica y el incremento progresivo de los casos ponen en riesgo a todo el país. Ante tal situación, autoridades de salud han desarrollado el programa de Manejo Integrado de *Aedes* que identifica escenarios operativos de la transmisión y focaliza las actividades de prevención y control contra los mosquitos *Aedes*.

Abstract

Dengue, chikungunya, and Zika are diseases transmitted by the bites of female mosquitoes of the genus *Aedes*. For many years, dengue has been associated with tropical climates; however, this is changing. In Mexico, it has been proven that the mosquito has adapted and spread to cities and large urban centers with temperate climates, where these diseases were previously absent. This geographic expansion, coupled with a progressive increase in cases, puts the entire country at risk. In response, health authorities developed the Integrated *Aedes* Management program, identifying operational transmission scenarios and focusing on prevention and control activities against *Aedes* mosquitoes.

Introducción

En México, los primeros brotes de dengue ocurrieron antes del siglo XIX y los primeros casos confirmados por laboratorio se registraron a principios de la década de 1970. A partir de entonces las autoridades sanitarias han reportado brotes epidémicos cada 3 a 5 años. El último brote epidémico importante ocurrió



entre 2023 y 2025, cuando se observó la transmisión autóctona en grandes centros metropolitanos con climas templados, a alturas arriba de los 1 200 msnm (metros sobre el nivel de mar), distribuidos en el centro y norte del país, incluidos estados como Puebla, Aguascalientes, Guanajuato, Zacatecas, San Luis Potosí, Querétaro y el desierto de Chihuahua. La reciente reconfiguración de la distribución geográfica del *Aedes aegypti* y la transmisión del dengue en México han puesto de manifiesto la urgente necesidad de desarrollar e implementar estrategias de control del vector que modulen la transmisión, tomando en cuenta que el dengue no se comporta igual en todos los lugares ni en todas las épocas, y que depende de la interacción del mosquito, el virus y las personas. En este sentido, el Manejo Integrado de *Aedes* (MIA) emerge como una estrategia para la prevención y control del dengue, la chikungunya y el zika. ¿En qué consiste realmente esta estrategia? En las siguientes líneas conoceremos su enfoque y por qué es una estrategia clave para enfrentar estas enfermedades en México.

¿Qué es el Manejo Integrado de *Aedes*?

El MIA constituye un enfoque racional y sostenible que incluye un conjunto de intervenciones combinadas y sincronizadas en tiempo y espacio basadas en el conocimiento de la biología de *Aedes* (horarios de actividad, sitios de reposo, productividad de criaderos, dinámica poblacional, etc.), ciclos de transmisión, inmunidad de las poblaciones, cepas del agente causal, condiciones sociodemográficas y ecológicas, susceptibilidad a los insecticidas, variabilidad de la transmisión y factores que la modulan. El objetivo es reducir, contener, interrumpir o eliminar la transmisión mediante la reducción o eliminación de las condiciones que favorecen: 1) el desarrollo y abundancia de las poblaciones de *Ae. aegypti*, y 2) el contacto entre las poblaciones humanas sanas y las poblaciones infecciosas de *Ae. aegypti*.

Las autoridades de salud en México implementan el MIA identificando los escenarios operativos a través del análisis espacial de los datos de la vigilancia epidemiológica y entomológica con la finalidad de anticipar riesgos y focalizar acciones preventivas que



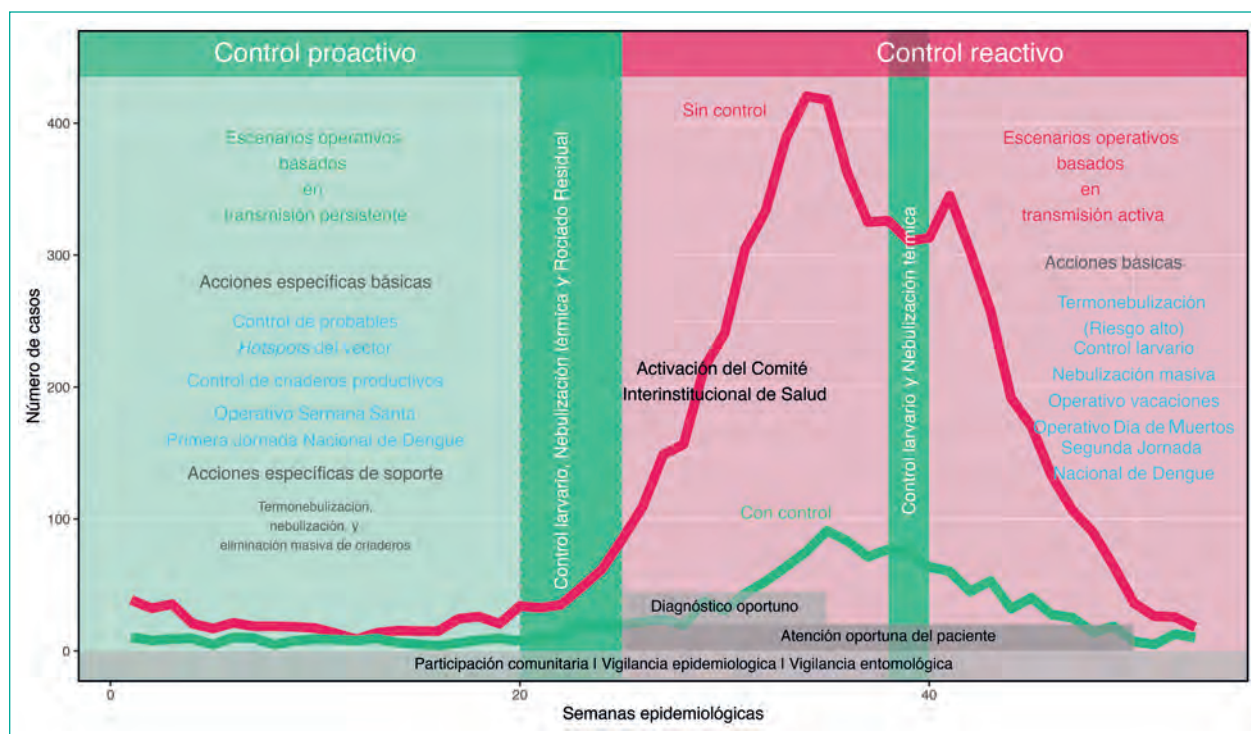


Figura 1. Ilustración esquemática del Manejo Integrado de *Aedes* en México.

protejan a las comunidades de las áreas urbanas endémicas y no endémicas de México (Figura 1).

El MIA incluye cinco componentes:

1. vigilancia entomológica y evaluación de las acciones antivectoriales;
2. empoderamiento y movilización de las comunidades;
3. control de la etapa acuática del ciclo de vida;
4. control de la etapa terrestre del ciclo de vida, y
5. monitoreo de la resistencia a insecticidas.

A continuación se profundiza en las actividades de prevención y control de los componentes tres y cuatro.

La estrategia de MIA en México migró del enfoque reactivo al enfoque proactivo. El enfoque reactivo se caracteriza por: 1) actividades de control en el segundo semestre del año, que es cuando se presenta la mayor cantidad de casos (brotes epidémicos), y 2) acciones de cobertura universal (campanas de salud pública en toda la ciudad). El enfoque proactivo tiene como objetivo prevenir que la población se en-

ferme y se presenten brotes implementando el MIA desde principios de año en las áreas de alto riesgo.

El enfoque proactivo se realiza en dos pasos. En el paso uno se identifican las áreas de alto riesgo, mientras que en el paso dos se ejecutan acciones específicas en los dos semestres del año (Figura 1). En el primer semestre las acciones sustantivas incluyen un control larvario (CL), la **nebulización térmica** peridomiciliar (NT) y el **rociado residual intradomiciliario**. En el segundo semestre, se realiza un reforzamiento con CL y NT. La finalidad del enfoque es romper el ciclo de vida en la etapa acuática y terrestre del mosquito, evitando el contacto *aedes*-humano y, por consiguiente, la transmisión.

Estas acciones se complementan con las acciones básicas y específicas que realiza la Secretaría de Salud, como son el control del vector en las casas de los casos probables y sus alrededores, operativos en Semana Santa, jornadas nacionales y acciones en sitios de concentración masiva y alto riesgo. Adicionalmente, las autoridades de los municipios, en coordinación con el sector salud, realizan acciones específicas de soporte como nebulización y elimina-

Nebulización térmica (NT)

Tratamiento de un área con aerosoles calientes que tiene lugar por medio de generadores de niebla que transforman una solución de baja concentración en una nube espesa de humo que lleva suspendidas las gotas del insecticida.

Rociado residual intradomiciliario (RRI)

En inglés *indoor residual spraying (IRS)*, consiste en la aplicación de un insecticida de larga duración con efecto residual en el interior de las viviendas (sobre superficies, por lo general en paredes) para eliminar artrópodos de importancia para la salud pública que aterrizan o descansan en ellas.



Descacharrización

Operativos de eliminación de criaderos desechables llevados a cabo por la comunidad, con la coordinación de la Secretaría de Salud y los municipios.

ción masiva de criaderos (**descacharrización**) en las áreas de mayor riesgo, y si los recursos lo permiten, en toda la localidad. Todas estas acciones son potencializadas por la población al eliminar los ambientes de desarrollo (criaderos) de la etapa acuática a través de la estrategia “lava, tapa, voltea y tira”.

Conclusiones

El Manejo Integrado de *Aedes* es una estrategia esencial para el control y prevención del dengue, la chikungunya y el zika. El control efectivo y sostenido de estas enfermedades no sólo depende de una exi-

tosa implementación del MIA, sino de la creación de una sinergia con la población y la ciencia que permita desarrollar hábitos saludables personales y comunitarios para crear entornos libres de enfermedades.

Felipe A. Dzúl-Manzanilla

Instituto Nacional de Salud Pública.

felipe.dzul.m@gmail.com

Héctor Gómez-Dantés

Instituto Nacional de Salud Pública.

hector.gomez@insp.mx

Referencias específicas

- AMCA (2021), *Best Practices for Integrated Mosquito Management*, Sacramento, CA, American Mosquito Control Association.
- Dzul-Manzanilla, F, F. Correa-Morales, A. Che-Mendoza, J. Palacio-Vargas, G. Sánchez-Tejeda *et al.* (2021), “Identifying urban hotspots of dengue, chikungunya, and Zika transmission in Mexico to support risk stratification efforts: a spatial analysis”, *Lancet Planet Health*, 5(5):e277-e285. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/s2542-5196\(21\)00030-9](https://doi.org/10.1016/s2542-5196(21)00030-9).
- OPS (2019), *Documento operativo de aplicación del manejo integrado de vectores adaptado al contexto de las Américas*, Organización Panamericana de la Salud [en línea]. Disponible en: <https://iris.paho.org/handle/10665.2/51760>, consultado el 12 de mayo de 2026.
- OPS (2019), *Documento técnico para la implementación de intervenciones basado en escenarios operativos genéricos para el control del Aedes aegypti*, Organización Panamericana de la Salud [en línea]. Disponible en: <https://iris.paho.org/handle/10665.2/51654>, consultado el 12 de mayo de 2026.
- OPS (2019), *Estrategia de gestión integrada para la prevención y el control de las enfermedades arbovirales en las Américas*, Organización Panamericana de la Salud [en línea]. Disponible en: <https://iris.paho.org/handle/10665.2/51787>, consultado el 12 de mayo de 2026.
- WHO (2012), *Handbook for Integrated Vector Management*, Ginebra, World Health Organization. Disponible en: <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/324aeff7-417c-4afe-8588-53b85b774ec2/content>, consultado el 12 de mayo de 2026.
- WHO (2017), *Global vector control response 2017-2030*, Ginebra, World Health Organization. Disponible en: <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/68d92417-dd44-437d-bb8b-2befb7bdc732/content>, consultado el 12 de mayo de 2026.

Victoria Pando-Robles, Felipe Dzul y Fabián Correa Morales

¿Dengue en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México?

Evidencias y preguntas sobre la posibilidad de transmisión local

Resumen

Durante décadas, la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) se consideró libre de transmisión local del dengue. Su elevada altitud (alrededor de 2 200 metros sobre el nivel del mar), las temperaturas relativamente bajas y ciertas condiciones ambientales limitaban la presencia del mosquito vector. Sin embargo, en los últimos años esta situación ha comenzado a cuestionarse. La detección del mosquito *Aedes aegypti*, junto con el aumento de casos importados de dengue, ha abierto la pregunta científica en el campo de la salud: ¿es posible que el dengue se transmita localmente en la capital del país?

Abstract

For decades, the Mexico City Metropolitan Area was considered free of local dengue transmission. Its high altitude (around 2 200 meters above sea level), relatively low temperatures, and certain environmental conditions limited the presence of the mosquito vector. However, in recent years this situation has begun to be questioned. The detection of the *Aedes aegypti* mosquito, along with the increase in imported dengue cases, has raised the scientific question in the field of health: is it possible for dengue to be transmitted locally in the nation's capital?

El dengue: una enfermedad en expansión

El dengue es una enfermedad viral que afecta a cientos de millones de personas cada año a nivel mundial. Su agente causal es el virus del dengue, que posee cuatro serotipos distintos (DENV-1 a DENV-4). La infección ocurre cuando un mosquito infectado pica a una persona y le transmite el virus a través de su saliva.





Figura 1. Representación gráfica de la presencia del mosquito *Aedes aegypti* en la CDMX. Figura creada con ChatGPT.

El principal vector es el *Aedes aegypti*, un mosquito altamente adaptado a los ambientes urbanos. Vive cerca de las viviendas, se reproduce en recipientes con agua acumulada y tiene preferencia por alimentarse de sangre humana. Estas características lo convierten en un vector particularmente eficiente.

En México, el dengue es endémico en gran parte del territorio nacional, especialmente en regiones tropicales y costeras. Sin embargo, históricamente las zonas de mayor altitud —como la ZMCM— habían permanecido relativamente protegidas.

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) se localiza a una altitud promedio de 2 240 metros sobre el nivel del mar y comprende 16 alcaldías de la CDMX, 59 municipios del Estado de México y 1 municipio de Hidalgo; concentra una población de 21 436 911 habitantes, lo que representa aproximadamente una quinta parte de la población

total del país. Sólo la Ciudad de México alberga a 9 209 944 personas.

Un mosquito que cambia de territorio

En años recientes (a partir del 2015) se ha documentado la presencia de *Aedes aegypti* en distintas zonas de la Ciudad de México y su área metropolitana. Este hallazgo ha sido posible gracias a programas de vigilancia entomológica que monitorean la distribución de mosquitos vectores.

La aparición del mosquito en altitudes donde antes no se encontraba plantea una pregunta clave: ¿qué está cambiando?

Diversos factores podrían estar contribuyendo a esta expansión. Entre ellos destacan el aumento de la temperatura asociado al cambio climático, el fenómeno de “isla de calor” —que puede permitir que

los huevos del mosquito sobrevivan al invierno—, la urbanización acelerada, la acumulación de recipientes que almacenan agua y la intensa movilidad de personas entre regiones del país. Estos elementos crean condiciones favorables para que el mosquito se establezca en nuevos territorios.

Aunque la presencia del vector es un requisito fundamental para la transmisión del dengue, no es suficiente por sí sola para que ocurran brotes. Para que exista transmisión local deben coincidir varios factores: mosquitos capaces de transmitir el virus, personas infectadas que introduzcan el virus en la población y condiciones ambientales que permitan completar el ciclo de transmisión.

Casos importados: una pieza clave del rompecabezas

Cada año se registran en la ZMCM numerosos casos importados de dengue. Se trata de personas que se infectaron en otros estados del país —donde la enfermedad es endémica— y que desarrollan síntomas al regresar a sus hogares en la ZMCM.

Desde el punto de vista epidemiológico, estos casos son importantes porque durante varios días las personas infectadas pueden tener el virus circulando en la sangre. Si durante ese periodo son picadas por un mosquito susceptible, éste podría adquirir el virus y transmitirlo a otra persona. Este escenario representa el primer paso para que ocurra la transmisión.

De manera preocupante, en las últimas décadas el número de casos importados ha aumentado considerablemente en la ZMCM: pasó de 8 casos en 2008 a 528 en 2024 (Figura 2). Este incremento eleva la probabilidad de que personas infectadas coincidan en tiempo y espacio con mosquitos vectores, situación que constituye el primer paso para que pueda iniciarse la transmisión local.

¿Existe transmisión autóctona en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México?

Hasta ahora, la evidencia disponible indica que la gran mayoría de los casos de dengue diagnosticados en la capital corresponden a casos importados; es decir, infecciones adquiridas en otras regiones del

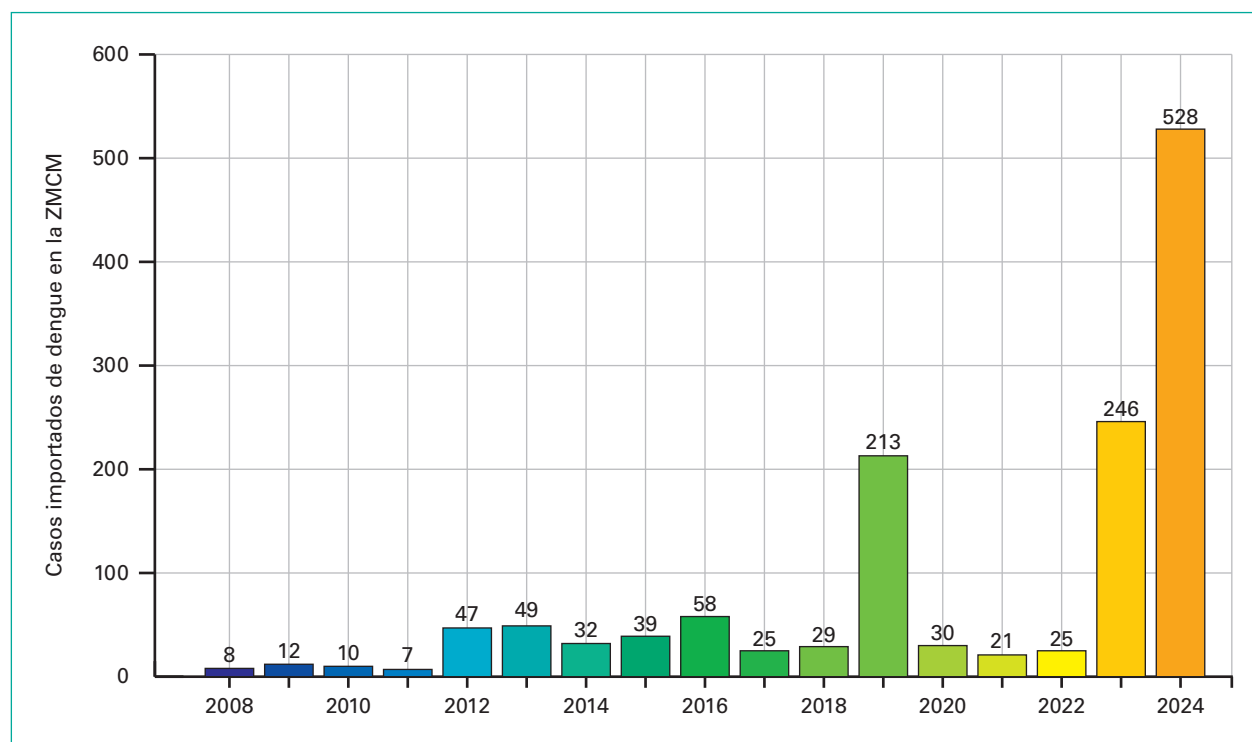


Figura 2. Casos importados de dengue en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Elaborada por los autores.

país donde el dengue es endémico. Sin embargo, algunos estudios han planteado la posibilidad de que ocurran eventos esporádicos de transmisión local.

Demostrar la transmisión autóctona no es sencillo. Para confirmarla es necesario descartar que la persona enferma haya viajado recientemente a una zona endémica y, además, contar con evidencia epidemiológica o entomológica que respalde el contagio local. Esto puede incluir, por ejemplo, la identificación de mosquitos infectados con el virus del dengue en el área donde reside el paciente, así como la detección de otros casos vinculados en tiempo y espacio.

Esta posibilidad ya no resulta tan lejana. Un estudio publicado en abril de 2024 documentó el primer caso de transmisión autóctona (infección local) en Tultitlán, Estado de México. El caso correspondió a una persona con diagnóstico de dengue confirmado por laboratorio y sin antecedentes de viaje a zonas endémicas. No obstante, hasta el momento no hay evidencia de más casos similares, ni se ha documentado la presencia de mosquitos infectados con el virus del dengue en la zona, lo que sugiere que, de existir transmisión local, ésta sería limitada o de muy baja intensidad.

En este contexto, la vigilancia epidemiológica y entomológica, junto con la investigación científica, continúan siendo fundamentales para detectar oportunamente posibles eventos de transmisión local, caracterizar su magnitud y comprender mejor el riesgo de dengue en la ZMCM.

Vigilancia y prevención: una tarea colectiva

Aunque el riesgo actual de transmisión sostenida en la ZMCM sigue siendo bajo en comparación con regiones tropicales del país, la presencia del mosquito vector obliga a mantener una vigilancia constante.

Las medidas de prevención siguen siendo las mismas que en cualquier región donde pueda reproducirse el mosquito: evitar la acumulación de agua en recipientes, tapar depósitos de agua, limpiar patios y azoteas, y eliminar objetos que puedan funcionar como criaderos.

La historia reciente de las enfermedades transmitidas por mosquitos muestra que los límites geográficos

pueden cambiar con relativa rapidez. No debemos olvidar que algunos países europeos como Francia, España e Italia presentan brotes de dengue. Por ello, comprender cómo se adaptan los vectores a nuevos entornos urbanos será fundamental para proteger la salud pública en las grandes ciudades del siglo XXI.

Victoria Pando-Robles

Centro de Investigación Sobre Enfermedades Infecciosas, Instituto Nacional de Salud Pública.

victoria.pando@insp.mx

Felipe Dzul

Centro de Investigación en Sistemas de Salud, Instituto Nacional de Salud Pública.

felipe.dzul.m@gmail.com

Fabián Correa Morales

Dirección de Enfermedades Transmitidas por Vectores, Centro Nacional de Control y Prevención de Enfermedades.

fabian.correa@salud.gob.mx

Referencias específicas

- Harish, V., F. J. Colón-González, F. R. R. Moreira, R. Gibb, M. U. G. Kraemer *et al.* (2024), “Human movement and environmental barriers shape the emergence of dengue”, *Nature Communications*, 15(1):4205. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48465-0>.
- Kuri-Morales, P., F. Correa-Morales, C. González-Acosta, G. Sánchez-Tejeda, E. Dávalos-Becerril *et al.* (2017), “First report of *Stegomyia aegypti* (= *Aedes aegypti*) in Mexico City, Mexico”, *Medical and Veterinary Entomology*, 31(2):240-242. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/mve.12225>.
- Mejía-Guevara, M. D., F. Correa-Morales, C. González-Acosta, E. Dávalos-Becerril, J. L. Peralta-Rodríguez *et al.* (2020), “*Aedes aegypti*, the dengue fever mosquito in Mexico City. Early invasion and its potential risks” [“El mosquito del dengue en la Ciudad de México. Invasión incipiente de *Aedes aegypti* y sus potenciales riesgos”], *Gaceta Médica de México*, 156(5):382-389. Disponible en: <https://doi.org/10.24875/GMM.M20000425>.
- Secretaría de Salud (2020), *Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica* [en línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/salud/acciones-y-programas/sistema-nacional-de-vigilancia-epidemiologica>, consultado el 15 de mayo de 2026.

Novedades científicas

Desde la UAM

Reseñas de libros

Desde las redes

Noticias de la AMC



El funcionamiento oculto de la vida

Resumen

El funcionamiento de los ecosistemas resulta de las interacciones que entablan los organismos vivos con el medio que los rodea. Esto da lugar a los servicios ambientales que sustentan nuestra existencia. Sin embargo, la degradación ambiental que estamos provocando pone en riesgo estos procesos, lo que amenaza nuestro bienestar.

Abstract

The functioning of ecosystems results from interactions between living organisms and their environment. This gives rise to the environmental services that support our existence. However, the environmental degradation we are causing puts these processes at risk, and this threatens our well-being.

Funciones ecosistémicas y servicios ambientales

Los ecosistemas son espacios físicos donde las especies interactúan entre ellas y con los elementos de su **entorno abiótico**, dando lugar a flujos de materia y energía. Por ejemplo, las plantas terrestres absorben agua y minerales del suelo, capturan dióxido de carbono de la atmósfera y cosechan energía solar para sintetizar carbohidratos, proteínas, lípidos y otros compuestos orgánicos que almacenan en forma de biomas. Los animales herbívoros consumen la biomasa de las plantas para generar su propia biomasa y, a su vez, pueden ser consumidos por animales carnívoros. Todas estas interacciones entre organismos generan residuos, incluidos sus propios cuerpos cuando mueren, que son reincorporados a los compartimentos abióticos de los ecosistemas mediante procesos de degradación. De esta manera, la materia y la energía fluyen dentro de los ecosistemas.

Aunque el ejemplo anterior se centra en los flujos de materia y energía que se producen mediante interacciones que involucran la generación o consumo de alimentos, en los ecosistemas ocurren interacciones de muchos otros tipos. Bajo esta perspectiva, podemos concebir los ecosistemas como tejidos, donde los

Entorno abiótico

Componentes no vivos de un ecosistema, lo cual incluye factores físicos, como la luz y la temperatura; y químicos, como el agua y los nutrientes minerales del suelo.



hilos que los componen son los flujos de materia y energía que entrelazan a las especies y a los elementos abióticos. Cada uno de estos hilos se denomina *función ecosistémica* y, en su conjunto, dan lugar al *funcionamiento ecosistémico*. Así, la integridad del tejido ecosistémico se mantiene mientras no se pierdan especies ni se modifiquen sus elementos abióticos.

La existencia de todas las especies depende de esos flujos de materia y energía. Incluso, muchas funciones ecosistémicas tienen valor agregado para la humanidad porque sustentan nuestro bienestar y, por ello, se las denomina *servicios ambientales*. Algunos ejemplos de estos servicios son el agua que consumimos, que es capturada y almacenada en los ecosistemas, la depuración atmosférica de nuestro entorno, que se lleva a cabo en ecosistemas que secuestran dióxido de carbono y liberan oxígeno. Estos servicios ambientales, entre muchos otros, dependen directamente de la integridad del tejido ecosistémico y, si éste se debilita, se reduce nuestro bienestar actual y el de las generaciones futuras.

Funcionamiento ecosistémico y biodiversidad

Comúnmente imaginamos que la palabra *biodiversidad* se refiere a todas las especies que residen en un ecosistema natural. En ecología, esto comúnmente se denomina *riqueza de especies*, pero la biodiversidad es mucho más que eso porque también involucra las funciones ecosistémicas que esas especies desarrollan. Esto llevó a proponer que el funcionamiento de los ecosistemas se potencia con su riqueza de especies, ya que una mayor diversidad de organismos implicaría más flujos de materia y energía. En nuestra analogía anterior, más especies originarían tejidos ecosistémicos con más hilos.

Esta propuesta fue sustentada con observaciones y experimentos, demostrándose que la eficiencia en la generación de biomasa, el reciclaje de nutrientes y el uso del agua, entre otras funciones ecosistémicas, se incrementan con la riqueza de especies. Entonces, con una mayor cantidad de especies se optimizan los flujos de materia y energía en los ecosistemas, y esto representa más servicios ambientales y de mejor calidad para los seres humanos. Sin embargo, el creci-



miento acelerado de la población humana durante el último siglo ha aumentado la demanda de alimentos y otras materias primas, así como también de espacio y energía, lo que en última instancia ha causado problemas ambientales globales que ponen en riesgo el funcionamiento de los ecosistemas y nuestro propio bienestar. Si esa situación de degradación ambiental continúa avanzando, surge una pregunta fundamental: ¿qué ocurrirá con las relaciones entre el funcionamiento ecosistémico y la riqueza de especies y, en consecuencia, con los servicios ambientales en el futuro?

Contestar esta pregunta requiere entender cómo las diferentes especies de un ecosistema usan la materia y la energía disponible en su entorno. Para esto, podemos pensar que cada especie emplea una fracción única de la materia y la energía disponibles en el ecosistema, que no es utilizada por las demás especies. Dentro del tejido ecosistémico, esto significaría que cada especie da lugar a hilos que ninguna otra especie puede generar. Como ejemplo, imaginemos un bosque donde algunas plantas con raíces profundas utilizan agua subterránea, mientras que plantas con raíces cortas solamente aprovechan el agua superficial que se acumula en el suelo tras las lluvias. Así, cada grupo de plantas se abastece de agua a una profundidad diferente. Las especies de estos dos grupos son funcionalmente *complementarias* porque ninguna usa el mismo recurso de la misma forma.

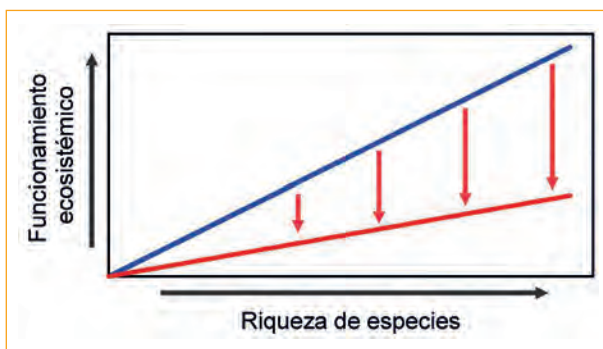


Figura 1. Si las especies de un ecosistema son funcionalmente complementarias, las relaciones entre su funcionamiento y su riqueza de especies son positivas y lineales. En azul se representa una relación donde las especies operan bajo condiciones ambientales normales. En rojo se muestra la misma relación, pero la contribución de las especies al funcionamiento ecosistémico es menor porque están expuestas a factores ambientales adversos, representados con las flechas rojas verticales.

Así, el funcionamiento ecosistémico aumenta de manera directa y proporcional a la riqueza de especies, como lo describen ambas líneas de la **Figura 1**.

Aunque se han propuesto otros mecanismos para explicar las relaciones entre el funcionamiento de los ecosistemas y su riqueza de especies, la existencia de especies funcionalmente complementarias permite analizar con facilidad cómo nuestras actividades pueden afectarlas en el futuro. Un primer escenario que se puede considerar es la extinción de especies debido al avance de la degradación ambiental. En este caso, cabría esperar que los ecosistemas pierdan funciones conforme se reduce su número de especies, lo que sería equiparable a retirar progresivamente los hilos que componen el tejido ecosistémico hasta que colapse.

Una mayor degradación ambiental también podría reducir la capacidad de las especies para procesar materia y energía, sin necesariamente causar su extinción. Esto comúnmente ocurre cuando los organismos son expuestos a contaminantes, temperaturas extremas o cualquier otro factor que les resulte adverso. Si esto ocurre, aún habría relaciones positivas entre el funcionamiento y la riqueza de especies de los ecosistemas, pero el aporte de cada especie al funcionamiento sería menor al que realiza cuando no es afectada por esos factores. Esto lo muestra la línea roja de la **Figura 1** y, en términos del tejido ecosistémico, equivaldría a decir que el número de hilos que contiene es el mismo, pero son más delgados y frágiles.

También es posible que la degradación ambiental cause los dos efectos anteriores, llevando a algunas especies a la extinción y reduciendo la capacidad de otras para procesar materia y energía. Éste sería el escenario más dramático, ya que comprometería fuertemente la integridad estructural del tejido ecosistémico y su capacidad para proveernos de servicios ambientales. Bajo estos tres escenarios, a continuación se comenta un caso de estudio desarrollado en México sobre este tema.

■ Funcionamiento ecosistémico y cambio climático

■ La sección anterior ilustra cómo las actividades humanas pueden eliminar o debilitar los hilos del



Figura 2. Fotografía de un experimento de campo realizado con cámaras de techo abierto y refugios de lluvia para simular las condiciones de cambio climático que se esperan en México.

complejo tejido que sustenta el funcionamiento de los ecosistemas y hoy en día enfrentamos una crisis ambiental sin precedentes. Uno de los mayores exponentes de esta crisis es el cambio climático debido al aumento en la emisión de gases de efecto invernadero por parte de nuestras sociedades, lo que está causando aumentos de la temperatura y alteraciones en los regímenes de precipitación en todo el planeta.

Los ecosistemas de México serán fuertemente afectados por este fenómeno. Se espera que la temperatura promedio en el país aumente hasta 3°C y que la precipitación anual disminuya más de un 10%, en comparación con los valores actuales de

esas variables. Estos cambios climáticos pueden incrementar el riesgo de extinción de muchas especies y disminuir el desempeño de otras para procesar materia y energía, lo que en última instancia afectará el funcionamiento de los ecosistemas. Para explorar estos efectos, investigadores del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica han desarrollado experimentos dirigidos a evaluar los efectos del cambio climático sobre las relaciones entre el funcionamiento ecosistémico y la riqueza de las especies.

Estos experimentos se realizaron en ecosistemas semidesérticos de México que son dominados por plantas herbáceas. Para esto, se agruparon aleatoriamente semillas de plantas, con una variación en el número de especies de cada conjunto. Parte de estos conjuntos de semillas se sembraron en campo bajo las condiciones climáticas actuales, mientras que otra parte se sembró bajo condiciones simuladas de cambio climático. Para simular estas condiciones en el campo, se usaron cámaras de techo abierto confeccionadas con acrílico transparente, las cuales permiten incrementar la temperatura. Además, para reducir la precipitación, sobre esas cámaras se instalaron canales que interceptan parte de la lluvia. Estas estructuras se muestran en la [Figura 2](#) y, una vez que las plantas se desarrollaron tanto dentro como fuera de ellas, los conjuntos de especies se cosecharon. Después, se determinó la biomasa de cada conjunto de especies, que es una variable que integra muchas funciones ecosistémicas. Con esta información, se estimaron las relaciones entre la biomasa vegetal y la riqueza de especies bajo el clima actual y el clima futuro.

Como era de esperar, la producción de biomasa vegetal se incrementó con la riqueza de especies, tanto bajo el clima actual como bajo condiciones simuladas de cambio climático. No obstante, los resultados también mostraron que el aumento en la temperatura y la disminución en la precipitación que se esperan en el futuro pueden eliminar algunas especies vegetales, así como limitar la producción de biomasa en otras. Estas experiencias predicen un panorama desalentador para las relaciones entre el funcionamiento ecosistémico y la riqueza de especies,

lo que indica que el avance del cambio climático volverá más frágil el tejido ecosistémico, rompiendo algunos de sus hilos y debilitando otros. Lo desalentador de estos resultados, sin embargo, no debe generalizarse, ya que solamente reflejan efectos del cambio climático en ecosistemas semidesérticos que contienen plantas herbáceas. Por ello, se requieren más experimentos para establecer fehacientemente que otros ecosistemas responderán de la misma forma. De todas maneras, esto no significa que debamos esperar más tiempo para activar nuestros esfuerzos de mitigación del cambio climático. Por el contrario, estos resultados ponen en evidencia la necesidad de emprender acciones urgentes para detener la degradación ambiental que nuestras actividades causan en los ecosistemas.

Pablo Siller-Clavel

División de Ciencias Ambientales, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica.

pablo.siller@ipicyt.edu.mx

Ernesto I. Badano

División de Ciencias Ambientales, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica.

ernesto.badano@ipicyt.edu.mx

**Lecturas recomendadas**

Giller, P. S. y G. O'Donovan (2002), "Biodiversity and ecosystem function: do species matter?", *Biology and Environment: Proceedings of the Royal Irish Academy*, 102(3):129-139. Disponible en: <https://www.jstor.org/stable/20500160>, consultado el 28 de mayo de 2026.

Hassan, R., R. Scholes y N. Ash (2005), *Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends*, EUA, Island Press.

Anayeli Hernández Sain, Elena Palacios Mechetnov y Crisantema Hernández



El papel de los ácidos grasos poliinsaturados en la dieta del camarón de calidad

Resumen

Los ácidos grasos poliinsaturados son esenciales en la dieta del camarón. Los ácidos araquidónico, eicosapentaenoico y docosahexaenoico son fuentes clave de energía, regulan la inflamación y protegen contra enfermedades. Debido al consumo global del camarón, el impacto de los ácidos grasos poliinsaturados en su calidad ha generado interés por sus beneficios potenciales para la salud pública.

Abstract

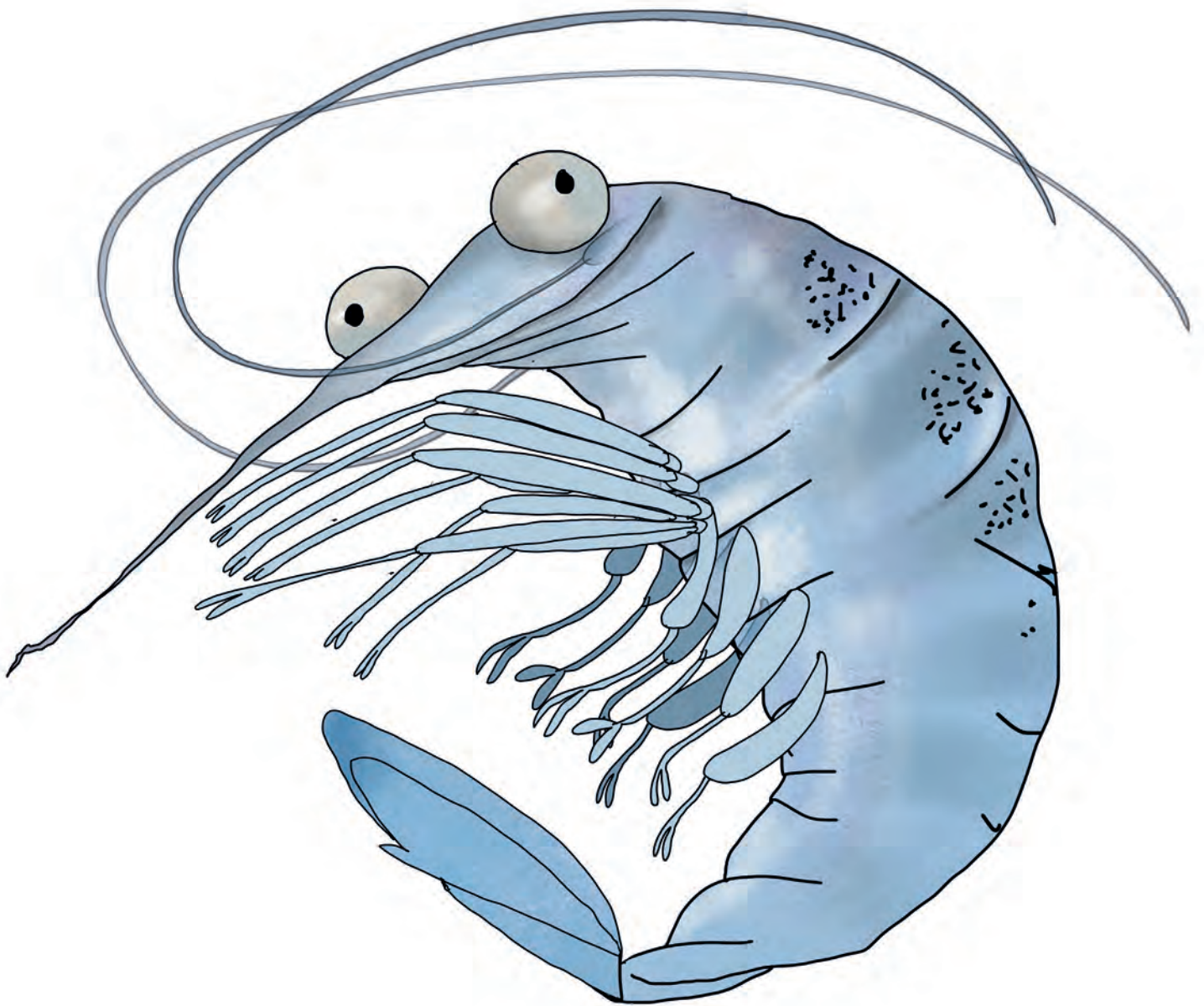
Polyunsaturated fatty acids are essential to the shrimp diet. Arachidonic, eicosapentaenoic, and docosahexaenoic acids are key energy sources, regulate inflammation, and protect against disease. Due to rising global shrimp consumption, the impact of polyunsaturated fatty acids on shrimp quality has generated interest in their potential public health benefits.

Introducción

La acuicultura del camarón ha experimentado un rápido crecimiento en las últimas décadas, impulsada por la alta demanda global y la eficiencia productiva de esta actividad. A nivel mundial, la acuicultura se ha convertido en la principal fuente de producción de organismos acuáticos, alcanzando más de 130 millones de toneladas y superando por primera vez a la pesca de captura (FAO, 2024). En particular, la producción de camarón continúa en expansión dentro del sector acuícola, con tasas de crecimiento destacadas y una creciente participación en el mercado global. Este aumento ha generado una mayor demanda de alimentos balanceados e ingredientes **nutracéuticos** para optimizar su crianza y producción. El significado del término “alta calidad”, hablando de organismos criados en sistemas acuícolas, implica una alta tasa de supervivencia, así como un alto potencial de crecimiento y producción. En este sentido, se ha demostrado que los

Nutracéuticos

Productos derivados de fuentes naturales que contienen nutrientes o compuestos bioactivos con posibles beneficios para la salud del camarón.



ácidos grasos con los que se alimentan los camarones modifican su potencial de crecimiento y pueden volverlos más resistentes al estrés y a las enfermedades (Kumar, 2024).

Los ácidos grasos son componentes fundamentales de los lípidos, un grupo de sustancias esenciales para el funcionamiento del organismo, y según su estructura química, se clasifican en ácidos grasos saturados (SFA, según sus siglas en inglés), monoinsaturados (MUFA) y poliinsaturados (PUFA). Los SFA no presentan dobles enlaces entre sus átomos de carbono, ya que están completamente saturados de hidrógeno. En cambio, los MUFA contienen un único doble enlace, mientras que los PUFA tienen dos o más enlaces dobles. Dentro de este último grupo, los que cuentan con más de 20 carbonos se consideran de cadena larga y se conocen como ácidos grasos altamente insaturados (HUFA) (Figura 1).

Ahora bien, los ácidos grasos se almacenan como triglicéridos y constituyen una fuente clave de energía para las células. Al combinarse con glicerol y un grupo fosfato, los ácidos grasos pueden formar moléculas especiales llamadas fosfolípidos, que constituyen una parte fundamental de las membranas celulares. La naturaleza de estos fosfolípidos y de los ácidos grasos que los integran influye directamente en el funcionamiento metabólico y en la salud.

Una clasificación adicional de los ácidos grasos con dobles enlaces se basa en la posición de estos enlaces. Los HUFA –con mayor actividad biológica y esenciales en varios procesos metabólicos y fisio-

lógicos– son el 20:4 ω -6 (ARA, ácido araquidónico), el 20:5 ω -3 (EPA, eicosapentaenoico) y el 22:6 ω -3 (DHA, ácido docosahexaenoico). Los HUFA ω -3 y ω -6 desempeñan un papel clave en la comunicación entre las células al actuar como señales que activan distintos “interruptores” celulares, como los receptores PPAR y LXR y la proteína SREBP, capaces de controlar que ciertos genes se enciendan o se apaguen, lo que contribuye a regular el equilibrio de las grasas en el organismo, un proceso conocido como homeostasis de los lípidos, que es fundamental para mantener un metabolismo saludable. También, ciertos HUFA son precursores de prostaglandinas, leucotrienos, resolvinas, protectinas y lipoxinas, hormonas que participan en la regulación de la inflamación, la respuesta protectora a lesiones, infecciones y otras funciones fisiológicas. Asimismo, los ácidos grasos insaturados ayudan a que el organismo produzca sustancias que controlan la inflamación, ajustan la composición de las grasas en las células y activan sistemas internos que les permiten responder a señales importantes, lo que contribuye al fortalecimiento de la respuesta del sistema inmune (Figura 2) (Al-Khalaifah, 2020).

Los camarones, al igual que otros organismos marinos, no pueden generar por sí solos los HUFA ω -3 y ω -6 (como ARA, EPA y DHA) a partir de PUFA, sino que deben obtenerlos de su dieta. Estos ácidos grasos esenciales son cruciales para su crecimiento y reproducción, y su deficiencia puede causarles problemas de salud y aumentar la mortalidad. Los PUFA ω -6 se

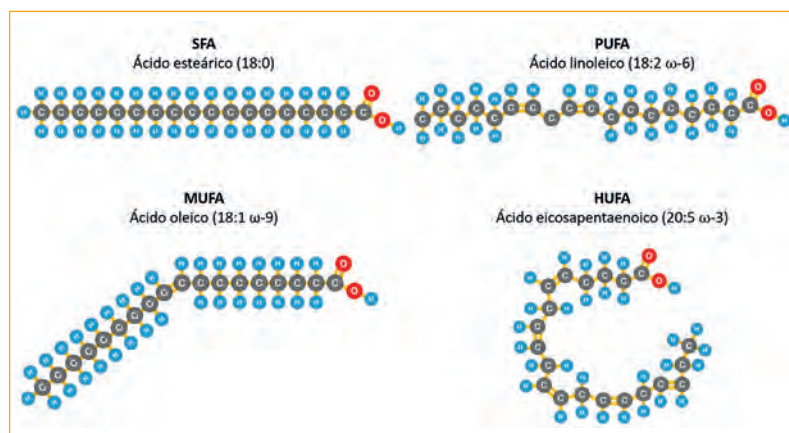


Figura 1. Ácidos grasos. Ilustración elaborada por Anayeli Hernández Sain.

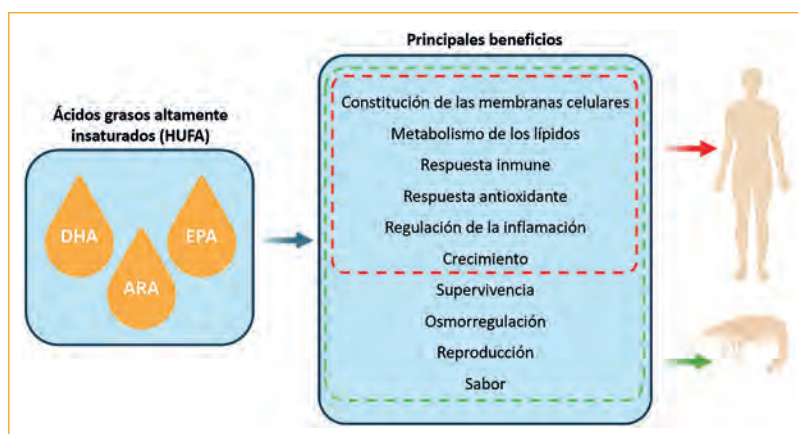


Figura 2. Principales beneficios de los ácidos grasos altamente insaturados. Ilustración elaborada por Anayeli Hernández Sain.

encuentran en alimentos de origen animal y vegetal, como carnes, frutos secos y aceites vegetales; mientras que los PUFA y HUFA ω -3 predominan en fuentes marinas como pescados y algas. Dado que el camarón no puede sintetizar HUFA, en su dieta se incluye aceite de pescado rico en HUFA ω -3.

■ Importancia de los ácidos grasos insaturados en el cultivo del camarón

■ En las etapas larvarias y postlarvales del camarón, se desarrollan órganos esenciales para la natación, la digestión y la **osmorregulación**. Para producir postlarvas saludables, se utilizan alimentos ricos en ARA, EPA y DHA, que mejoran la resistencia de estos crustáceos a las enfermedades y promueven su mayor supervivencia, crecimiento y calidad. La suplementación con ARA, EPA y DHA de fuentes alternas al aceite de pescado ha mostrado resultados similares a los del aceite convencional en el crecimiento y la supervivencia del camarón (*Penaeus vannamei*). Estos HUFA son esenciales en la formación de membranas celulares, síntesis de prostaglandinas, desarrollo reproductivo, osmorregulación, metabolismo de lípidos y respuesta inmune, contribuyendo al crecimiento y salud de las larvas y postlarvas.

Mantener niveles adecuados (0.50-0.68% del contenido dietético) de HUFA en postlarvas y en las primeras etapas juveniles del camarón blanco favorece la activación de mecanismos naturales de

defensa. Específicamente, estimula la acción de enzimas del sistema inmune como la profenoloxidasas (proPO), la fosfatasa alcalina (AKP) y la lisozima, lo que mejora la capacidad del organismo para responder a infecciones y aumenta su resistencia a las enfermedades. Los HUFA también intervienen en la β -oxidación, un proceso importante para obtener energía a partir de las grasas; de esta manera, ayudan a reducir la acumulación de lípidos y fortalecen la defensa antioxidante al estimular la actividad de enzimas como la superóxido dismutasa (SOD) y la catalasa (CAT) (Zhu y cols., 2023). Asimismo, la suplementación con HUFA mejora la supervivencia de las postlarvas de camarón ante cambios en la salinidad; este efecto se debe a que optimiza la actividad de la bomba sodio-potasio (Na^+/K^+ -ATPasa) y fortalece los mecanismos que regulan el equilibrio entre las sales y el agua (Yang y cols., 2019).

En especímenes juveniles de *Penaeus vannamei* alimentados sin aceite de pescado, la inclusión de niveles adecuados de ARA (entre 0.02 y 0.50%) regula la flexibilidad de las membranas celulares, el buen funcionamiento de enzimas y los sistemas de detección de señales importantes. También reduce los niveles de malondialdehído (MDA), una sustancia que indica daño oxidativo en las grasas del organismo, lo que sugiere una mayor protección celular. Además, aumenta la actividad de AKP y de lisozima, fortaleciendo la capacidad del camarón para defenderse de bacterias y reforzando su sistema inmune. Asimismo,

◀ Osmorregulación

Proceso biológico mediante el cual los organismos acuáticos regulan el equilibrio de agua y sales en su cuerpo para mantener un funcionamiento adecuado, incluso cuando cambia la salinidad del ambiente.

unos compuestos derivados del ARA, llamados eicosanoides, intervienen en el proceso de muda (cambio del exoesqueleto), lo que favorece el crecimiento, y se ha observado un aumento de DHA y EPA en los tejidos del camarón (Zhu y cols., 2023).

La inclusión de 0.25-1.00% de DHA y EPA en la dieta de especímenes juveniles mejora el rendimiento del crecimiento y mantiene las tasas de supervivencia similares a las de las dietas con aceite de pescado. Además, estos ω -3 mejoran el sistema inmunológico al fortalecer las células de defensa de los camarones llamadas hemocitos y al regular la inflamación, lo que provoca un aumento del número de hemocitos, la activación de enzimas protectoras, como la fenoloxidasa, y de enzimas antioxidantes, como la SOD, así como el refuerzo de la capacidad para eliminar bacterias dañinas, entre ellas *Vibrio harveyi* y *Vibrio parahaemolyticus*. Igualmente, el DHA y EPA en la dieta del camarón mejoran la calidad del producto y proporcionan altos niveles de estos ácidos grasos esenciales destinados al consumo humano, lo cual tiene efectos beneficiosos sobre el desarrollo y mitigación de una serie de condiciones patológicas en el ser humano.



Fuentes de HUFA para alimentos de camarón

Las necesidades nutricionales de los camarones dependen de ácidos grasos como ARA, EPA y DHA, que se obtienen eficientemente del aceite de pescado, derivados de pesquerías marinas que son finitas y limitantes. Para formular alimentos acuícolas se utilizan pescados ricos en HUFA ω -3 y ω -6, como sardinas, arenques, anchoas, macarela y atún, los cuales son eficaces para maximizar el crecimiento y eficiencia alimenticia de los crustáceos. Sin embargo, se ha reducido la inclusión del aceite de pescado en las dietas por el aumento de los costos globales.

En los últimos años, se ha incrementado el uso de aceites vegetales en la alimentación acuícola, reemplazando al aceite de pescado y mejorando la sostenibilidad al reducir la dependencia de ingredientes marinos. Sin embargo, esta transición disminuye los niveles de ácidos grasos poliinsaturados de cadena larga, lo que reduce la calidad nutricional de los productos. Se han evaluado vegetales terrestres ricos en ácidos grasos, como el aceite de girasol, de maíz, de soya, de cacahuete y de canola. Por otro lado, cuando los camarones se alimentan principalmente de este tipo de fuentes ricas en ácidos grasos monoinsaturados o saturados, su crecimiento, ganancia de peso y supervivencia son significativamente menores que cuando se alimentan con aceite de pescado. La composición de ácidos grasos en los camarones refleja su dieta. En particular, los organismos alimentados con aceites de origen marino presentan mayores concentraciones de HUFA, como EPA y DHA, esenciales para su desarrollo, respuesta inmune y rendimiento. En contraste, los aceites vegetales terrestres contienen principalmente ácidos grasos de cadena más corta, como ácido linoleico (LA; C18:2 ω -6) y el α -linolénico (ALA; C18:3 ω -3), y carecen o presentan niveles muy bajos de EPA y DHA (Riveroll y cols., 2024). Como los camarones no pueden transformar fácilmente estas grasas en otras más complejas, el uso de aceites vegetales suele dar lugar a perfiles lipídicos menos ricos en HUFA, lo que puede afectar negativamente su eficiencia alimenticia y su desempeño productivo. Por lo tanto, es fundamental continuar investigando y desarrollando alternativas sostenibles que puedan complementar las necesidades nu-

tricionales de los camarones sin comprometer su crecimiento y salud.

■ Las macroalgas marinas como fuente de ácidos grasos poliinsaturados

■ Como los HUFA se producen principalmente en el ambiente marino, ésta ha sido una perspectiva de los esfuerzos para encontrar nuevas fuentes. Si bien los HUFA pueden sintetizarse *de novo* en algunos invertebrados marinos, la gran mayoría se produce en la base de la cadena trófica marina, donde se incluyen principalmente las micro y macroalgas o sus consumidores primarios, como el zooplankton, o secundarios, como las sardinas y macarelas.

Algunas macroalgas marinas son ricas en ácidos grasos insaturados como ARA, EPA y DHA, aunque su contenido lipídico es bajo (1.00-5.00% en base seca). La composición de PUFA varía según el tipo de cloroplastos y rodoplastos que contienen: las algas rojas y pardas tienen más EPA y ARA, mientras que algunas verdes tienen más DHA (Hölzl y Dörmann, 2019). En nuestro país, las macroalgas han sido poco aprovechadas, a pesar de la necesidad de desarrollar tecnologías y productos de valor agregado a partir de ellas. El aumento de la biomasa de algunas especies representa un riesgo ecológico y un problema de contaminación biótica. Sin embargo, las macroalgas marinas pueden usarse como fuentes de PUFA en la alimentación acuícola y ofrecer beneficios a los cultivos. Investigaciones muestran que añadir macroalgas marinas frescas, biomasa seca o extracto líquido a la dieta del camarón blanco no es tóxico y mejora su crecimiento, su eficiencia alimenticia e inmunidad. Sin embargo, la mayoría de los estudios se enfocan en etapas avanzadas, y se requiere de más investigación en las etapas tempranas del ciclo de vida de *P. vannamei*.

■ Colesterol y camarón

■ Los camarones no pueden sintetizar colesterol, por lo que éste debe incluirse en su dieta para cumplir funciones esenciales, como la producción de hormonas y la formación de membranas celulares, neces-



rias para su crecimiento y desarrollo. Sin embargo, el colesterol es un ingrediente costoso en los alimentos acuícolas y, además, su reducción en el producto final puede ser deseable desde el punto de vista del consumidor. Por ello, actualmente se buscan alternativas que permitan sustituirlo sin afectar el desempeño productivo del cultivo.

Las macroalgas marinas son una fuente importante de fitoesteroles, compuestos similares al colesterol que pueden cumplir funciones análogas en las membranas celulares. Su inclusión en la dieta de camarones se ha propuesto como una estrategia para reducir el uso de colesterol dietético, con el potencial de obtener un producto más atractivo para el consumidor, sin afectar su crecimiento ni su rendimiento en cultivo (Van Doan y cols., 2023).

■ Perspectivas futuras para el uso de algas marinas en la camaronicultura

■ En la actualidad, en la camaronicultura hay una creciente demanda de larvas y postlarvas de alta calidad (Figura 3) para asegurar que la mayoría de los organismos sembrados lleguen al mercado como productos de buena calidad. Por lo tanto, el enfoque principal en la acuicultura se ha centrado en la prevención y control de enfermedades en camarones, lo cual es posible mediante la inclusión de ácidos grasos insaturados como el ARA (ω -6) y EPA y DHA (ω -3) en su dieta. Estos ácidos grasos presentes en macroalgas marinas pueden mejorar el estado nutricional de los **piensos acuícolas**. Sin embargo, su uso en postlarvas se ve limitado por su inestabilidad oxidativa y el pequeño

Pienso acuícola

Alimento elaborado especialmente para peces, camarones y moluscos, que aporta los nutrientes necesarios para su crecimiento, salud y desarrollo en sistemas de cultivo acuícola.

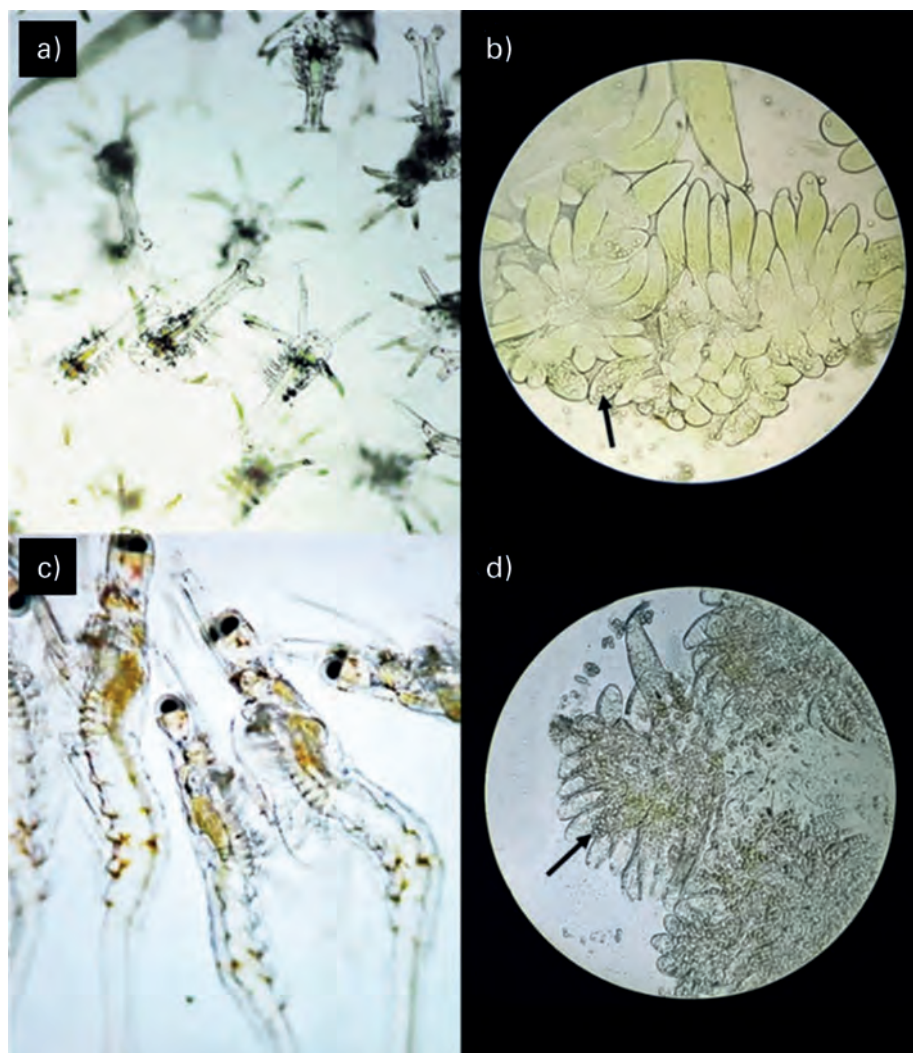


Figura 3. a) Larvas sanas de buena calidad. b) Acumulación de lípidos en los túbulos de larvas sanas (indicada por la flecha). c) Postlarvas sanas de buena calidad. d) Acumulación de lípidos en los túbulos de postlarvas sanas (indicada por la flecha). Crédito de imágenes: los paneles a) y c) son adaptaciones de imágenes de libre circulación disponibles en internet de autor no identificado; los paneles b) y d) son fotografías cortesía de Jesús Antonio García Aguirre.

Nanoencapsulación

Tecnología que consiste en recubrir sustancias beneficiosas, como vitaminas o nutrientes, dentro de cápsulas de tamaño nanométrico (10-1,000 nm) para protegerlas y mejorar su estabilidad, absorción y aprovechamiento en el organismo.

tamaño de los organismos, lo que afecta su biodisponibilidad (Martínez Soler y cols., 2023). La **nanoencapsulación**, aunque poco explorada en acuicultura, podría mejorar la estabilidad y biodisponibilidad de estos compuestos, garantizando su correcto aprovechamiento en organismos de alto interés acuícola como el camarón (Hernández-Sain y cols., 2025).

■ Efecto sobre la salud humana

■ Los ácidos grasos poliinsaturados son esenciales para la nutrición humana y animal porque el orga-

nismo no puede producirlos en cantidades suficientes y necesita incorporarlos a través de los alimentos; una vez consumidos, aportan energía y permiten que las células funcionen correctamente, manteniendo su flexibilidad y buen estado. Además, intervienen en la regulación de procesos fundamentales, como el crecimiento, la reproducción y las defensas del cuerpo, lo que contribuye a mantener el equilibrio y la salud general. Su consumo regular fortalece el sistema inmune y contribuye a controlar la inflamación, por lo que resultan clave para prevenir enfermedades y promover el bienestar. En este contexto, y ante

la creciente demanda de alimentos de alta calidad como el camarón, cobra especial importancia comprender cómo estos ácidos grasos influyen en su desarrollo, valor nutricional y calidad final. Dado que el camarón es uno de los productos acuícolas más consumidos a nivel mundial, el impacto de los ácidos grasos poliinsaturados en su calidad ha generado considerable atención. Esto se debe a su capacidad para mejorar el valor nutricional del producto y ofrecer una opción alimentaria sabrosa y con potencial para contribuir a la calidad de vida de la población.

Anayeli Hernández Sain

Laboratorio de Bromatología y Nutrición, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A. C., Unidad Mazatlán.
jhernandez223@estudiantes.ciad.mx

Elena Palacios Mechetnov

Metabolismo de lípidos, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C.
epalacio@cibnor.mx

Crisantema Hernández

Laboratorio de Bromatología y Nutrición, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A. C., Unidad Mazatlán.
chernandez@ciad.mx

Referencias específicas

- Al-Khalaifah, H. (2020), "Modulatory effect of dietary polyunsaturated fatty acids on immunity, represented by phagocytic activity", *Frontiers in Veterinary Science*, 7:569939. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.569939>.
- FAO (2024), "Informe de la FAO: La producción mundial de la pesca y la acuicultura alcanza un nuevo máximo histórico", Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Disponible en: <https://www.fao.org/newsroom/detail/fao-report-global-fisheries-and-aquaculture-production-reaches-a-new-record-high/es>, consultado el 22 de mayo de 2026.
- Hernández-Sain, A., E. Palacios-Mechetnov *et al.* (2025), "Seaweed potential as nutraceutical and functional food ingredient in shrimp aquaculture", *Animal Feed Science and Technology*, 330:116540. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2025.116540>.
- Kumar, V. (2024), *Feed and feeding for fish and shellfish: nutritional management*, Reino Unido, Academic Press. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/C2022-0-03280-3>.
- Martínez Soler, M., G. Courtois de Vicose *et al.* (2023), "Effect of HUFA in enriched artemia on growth performance, biochemical and fatty acid content, and hepatopancreatic features of *Penaeus vannamei* postlarvae from a commercial shrimp hatchery in Santa Elena, Ecuador", *Aquaculture Nutrition*, 2023(1):7343070. Disponible en: <https://doi.org/10.1155/2023/7343070>.
- Riveroll, A. S. L., N. M. Rendón y J. A. A. Ortega (2024), "Ácidos grasos omega-3, fuentes marinas, cultivos de plantas y su sostenibilidad ambiental", *Revista Multidisciplinaria/Voces de América y el Caribe*, 1(2):15-56. Disponible en: <https://doi.org/10.69821/REMUUVAC.v1i2.47>.
- Van Doan, H., P. Prakash, S. H. Hoseinifar *et al.* (2023), "Marine-derived products as functional feed additives in aquaculture: A review", *Aquaculture Reports*, 31:101679. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2023.101679>.
- Yang, Q., Zhang, W., Tan, B., Wang, F., Chi, S. *et al.* (2019), "Effects of dietary n-3HUFA on juvenile white shrimp, *Litopenaeus vannamei*: Growth, feed utilization, antioxidant enzymes activities and fatty acid compositions", *Aquaculture Research*, 50(3):882-894. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/are.13963>.
- Zhu, W., R. Dong, L. Ge *et al.* (2023), "Effects of dietary n-6 polyunsaturated fatty acids (PUFA) composition on growth performances and non-specific immunity in pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*)", *Aquaculture Reports*, 28:101436. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2022.101436>.

Óscar Daniel Lara Montaña, Claudia Gutiérrez Antonio y Manuel Toledano Ayala

Desafíos y oportunidades en la adopción de energías renovables: hacia un futuro sostenible

Resumen

Actualmente, la sociedad enfrenta la necesidad crítica de transitar de los combustibles fósiles hacia energías renovables como la solar, la eólica y la bioenergía. En este artículo se analizan, para cada tipo de energía, los obstáculos técnicos, económicos y sociales, así como las oportunidades que ofrecen para la innovación y el desarrollo sostenible. Se presentan datos recientes de costos de generación en los casos de Alemania, Uruguay, Brasil y Colombia, y se discute el papel de las políticas públicas, con énfasis en el caso mexicano.

Abstract

Today, society faces the critical need to transition from fossil fuels toward renewable energy sources such as solar, wind, and bioenergy. This article analyzes, for each type of energy, the technical, economic, and social obstacles, as well as the opportunities they offer for innovation and sustainable development. Recent generation-cost data are presented for the cases of Germany, Uruguay, Brazil, and Colombia, and the role of public policies is discussed, with an emphasis on the Mexican case.

Introducción

Desde la Revolución Industrial, el desarrollo tecnológico ha dependido de los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural), lo que ha generado contaminación atmosférica, emisiones de CO₂ y desastres asociados a su extracción y transporte. Pese a la diversificación de la matriz energética, en 2023 los fósiles representaron cerca del 80 % del consumo global de energía primaria y siguen siendo la columna vertebral del transporte y de gran parte de la generación eléctrica (IEA, 2024). Frente a este escenario, acuerdos como el de París impulsan la transición hacia las fuentes solar, eólica y de bioenergía, las cuales reducen el impacto ambiental en la medida en que su despliegue se acompaña de evaluaciones adecuadas, ya que no están exentas de efectos sobre los ecosistemas.



Las energías renovables son, además, cada vez más rentables. Entre 2010 y 2024, el costo nivelado de electricidad (LCOE, por sus siglas en inglés: *levelized cost of electricity*), que representa el costo promedio por kilovatio-hora a lo largo de la vida útil de una instalación, cayó 91 % para la solar fotovoltaica (de 0.460 a 0.043 USD/kWh) y de 0.111 a 0.034 USD/kWh para la eólica terrestre. En 2023, el LCOE promedio de los combustibles fósiles rondaba los 0.100 USD/kWh, por lo que generar electricidad con sol o viento es hoy entre dos y tres veces más barato que con carbón o gas natural (IRENA, 2025a). El principal reto es la intermitencia del sol y del viento, que exige almacenamiento y redes capaces de gestionar fuentes distribuidas. En este artículo se abordan, para cada tipo de energía renovable (solar, eólica y bioenergía), los retos técnicos, económicos y sociales, así como las oportunidades asociadas, en el caso de varios países y de México.

Energía solar: desafíos y oportunidades

Generalidades

La energía solar aprovecha la radiación del sol con fines térmicos o eléctricos. En el caso fotovoltaico,

las celdas convierten la luz en electricidad mediante el efecto fotoeléctrico (Figura 1); en el caso térmico, la radiación calienta un fluido que se emplea en procesos industriales o en la generación de vapor. La capacidad fotovoltaica instalada supera los 1.6 TW y crece a un ritmo superior al de cualquier otra fuente eléctrica (IRENA, 2025b).

Desafíos

El principal reto técnico es la intermitencia: la nubosidad puede reducir la generación entre 10 y 25 % respecto a un día despejado. Las baterías de ion-litio mitigan este problema; sin embargo, aunque su costo cayó 93 % entre 2010 y 2024 (de 2 571 a 192 USD/kWh de capacidad instalada) (IRENA, 2025a), la inversión sigue siendo considerable.

En lo económico, pese a que el costo total instalado promedio bajó a 691 USD/kW en 2024 (87 % menos que en 2010, IRENA, 2025a), la eficiencia comercial (entre 20 y 30 %) exige superficies extensas. La adopción depende de políticas que combinen incentivos fiscales, tarifas de alimentación garantizadas y estabilidad regulatoria; su ausencia frena el despliegue masivo (Al-Shetwi, 2022).

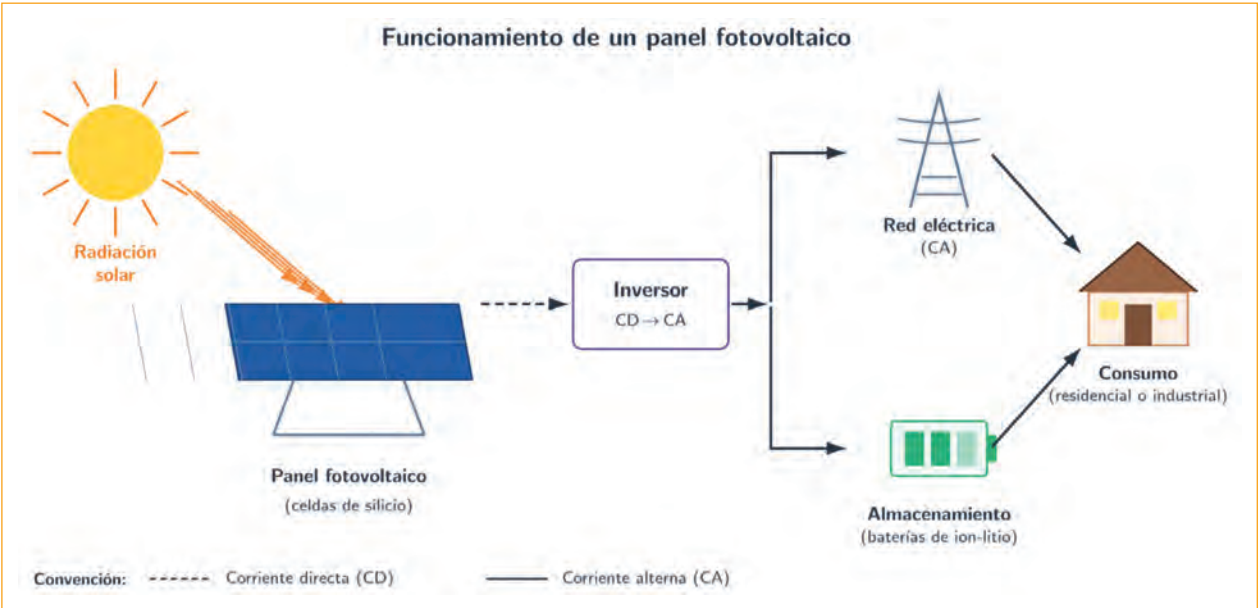


Figura 1. Esquema del funcionamiento de un panel fotovoltaico: la radiación solar incide sobre las celdas de silicio, que generan corriente directa (CD); un inversor la convierte en corriente alterna (CA), la cual puede inyectarse a la red eléctrica o almacenarse en baterías para abastecer el consumo residencial o industrial. Elaboración propia.

Oportunidades

La energía solar puede democratizar el acceso a la electricidad mediante sistemas que van desde plantas a gran escala hasta instalaciones residenciales, reduciendo la pobreza energética en comunidades urbanas y aisladas. Innovaciones en materiales como las **perovskitas** y las celdas solares de película delgada amplían la integración arquitectónica y la eficiencia. El sector impulsa el empleo en áreas de ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas (STEM, según las siglas en inglés) y la participación comunitaria mediante cooperativas solares y programas de capacitación.

Energía eólica: desafíos y oportunidades

Generalidades

La energía eólica convierte la fuerza del viento en electricidad mediante aerogeneradores: el viento hace

girar las aspas, que transfieren energía a un generador acoplado al rotor (**Figura 2**). Existen instalaciones terrestres (*onshore*), de menor costo y despliegue más rápido, e instalaciones marinas (*offshore*), con mayor factor de capacidad y menor impacto visual, pero con una inversión considerablemente mayor.

Desafíos

La variabilidad del viento se gestiona con redes adaptables y almacenamiento. La instalación en lugares remotos implica retos logísticos, como la construcción de caminos de acceso y la conexión a las líneas de transmisión.

En lo económico, la eólica terrestre es hoy la electricidad renovable más barata del mundo, con un LCOE promedio global de 0.034 USD/kWh y un costo instalado de 1 041 USD/kW en 2024; la eólica marina alcanza los 0.079 USD/kWh y 2 852 USD/kW (IRENA, 2025a). Frente a los 0.100 USD/kWh de los

Perovskitas

Familia de materiales con una estructura cristalina característica que, aplicados a celdas solares, ofrecen alta eficiencia de conversión y bajo costo de fabricación; constituyen una de las tecnologías fotovoltaicas emergentes más prometedoras.

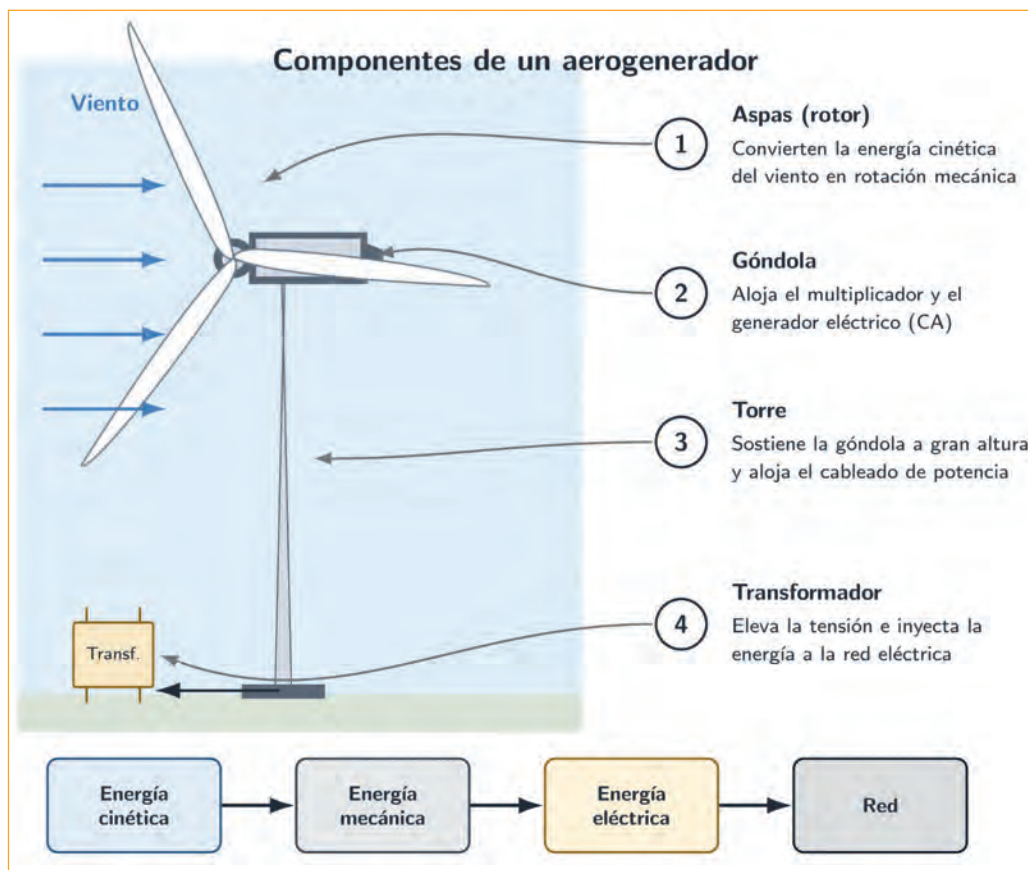


Figura 2. Componentes principales de un aerogenerador (aspas, góndola, torre y transformador) y flujo de conversión de la energía cinética del viento en energía eléctrica en corriente alterna inyectada a la red. Elaboración propia.

fósiles, la eólica terrestre es ~66 % y la marina ~21 % más barata. En lo social, la oposición por impacto visual y sonoro puede dificultar la expansión.

Oportunidades

La energía eólica es ya un pilar en regiones con buen recurso. Turbinas más grandes y eficientes aprovechan vientos a mayor altitud con menor impacto. Los parques eólicos generan ingresos rurales mediante arrendamientos a propietarios de terrenos y mejoran la percepción pública cuando los proyectos involucran y benefician directamente a las comunidades locales.

eólica, es despachable (puede generarse a demanda) y permite valorizar residuos agroindustriales que de otro modo representarían un pasivo ambiental.

Desafíos

La eficiencia de conversión varía con el tipo de biomasa y suele ser baja, lo que demanda avances tecnológicos. El LCOE global de la bioenergía se ubicó en 0.087 USD/kWh en 2024, valor superior al de la solar (0.043) y la eólica terrestre (0.034), aunque por debajo del de los fósiles (0.100); esta alza de 13 % anual se debe a la volatilidad de los precios de la biomasa y a mayores costos de recolección, procesamiento y transporte (IRENA, 2025a). En lo social, suscita debate por las emisiones netas de carbono y por el uso de tierras que podrían destinarse a la producción de alimentos.

■ ■ ■ **Bioenergía: desafíos y oportunidades**

■ *Generalidades*

■ La bioenergía se obtiene de biomasa de origen vegetal, animal o residual, transformada por rutas termoquímicas (combustión, gasificación, pirólisis) o bioquímicas (**digestión anaerobia**, fermentación) en calor, electricidad, gases combustibles (biogás, hidrógeno) o biocombustibles líquidos (bioetanol, biodiésel) (Figura 3). A diferencia de la solar y la

Oportunidades

Cuando se basa en residuos orgánicos, la bioenergía articula gestión de desechos y producción energética: convierte residuos agrícolas, forestales y urbanos en energía, reduce gases de efecto invernadero y promueve un manejo sostenible del suelo. Genera empleo en agricultura y manufactura, y la investigación

Digestión anaerobia
Proceso biológico en el que microorganismos descomponen materia orgánica en ausencia de oxígeno, generando biogás (rico en metano) y un residuo aprovechable como fertilizante.

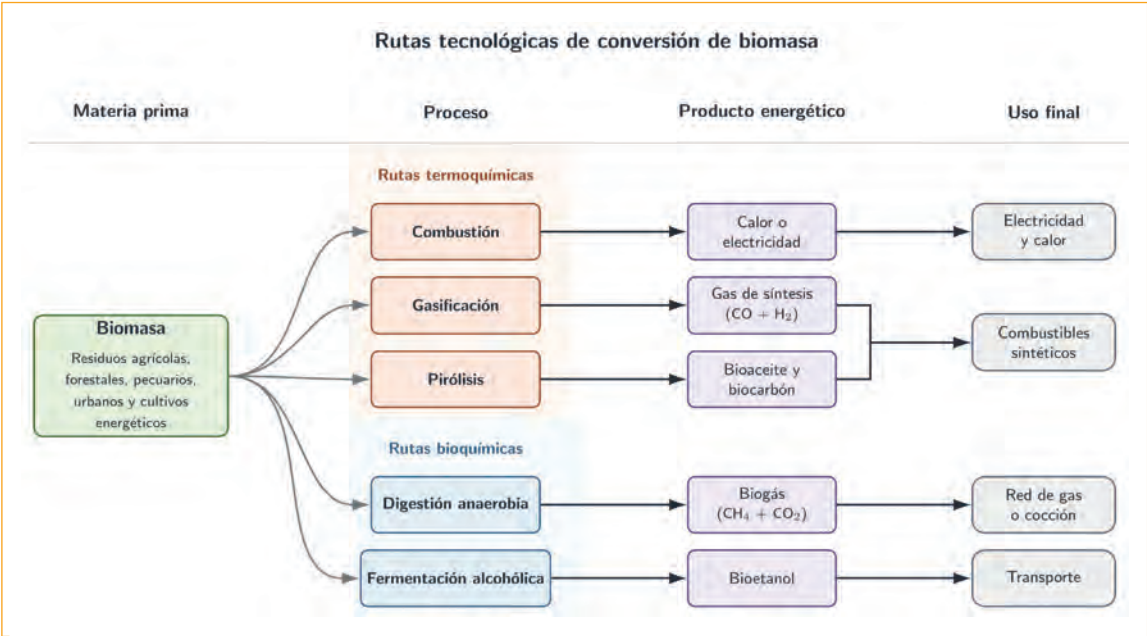


Figura 3. Rutas tecnológicas de conversión de biomasa. Rutas termoquímicas (combustión, gasificación y pirólisis) y rutas bioquímicas (digestión anaerobia y fermentación alcohólica), con sus principales productos energéticos y usos finales. Elaboración propia.

en biocombustibles de segunda y tercera generación (a partir de algas y residuos no alimentarios) apunta a mayores eficiencias y menor conflicto con la producción de alimentos.

La **Figura 4** resume los principales retos y oportunidades de las tecnologías analizadas.

Casos reales de implementación de energías renovables

En distintos países se han desarrollado proyectos pioneros que utilizan energías renovables y se apoyan en marcos regulatorios diseñados *ad hoc*. A continuación se presentan los casos de Alemania, Uruguay, Brasil y Colombia.

Alemania: líder en la transición energética

La iniciativa Energiewende ha reorientado el sistema energético alemán para reducir la dependencia de los fósiles. La Ley de Energías Renovables introdujo tarifas de alimentación garantizadas, un mecanismo que les asegura a los productores un precio fijo

por la electricidad que inyectan a la red durante un periodo determinado, lo que ha incentivado la inversión en energía solar y eólica. Con metas como la neutralidad climática para 2050, Alemania es un referente global en la gestión de la transición (Reichsteiner, 2021).

Uruguay: un modelo de éxito en América del Sur

Más del 95 % de la electricidad uruguaya proviene de fuentes renovables (hidroeléctrica, eólica y biomasa). La transición exigió cambiar la percepción pública de las renovables, expandir parques eólicos y modernizar la red, lo que generó empleo y redujo la dependencia de los combustibles fósiles. El caso ilustra cómo una visión gubernamental sólida y políticas adecuadas se traducen en cambios significativos (Jaeger, 2023).

Brasil: bioenergía y diversificación a gran escala

Cerca del 88 % de la electricidad brasileña proviene de fuentes limpias (hidroeléctrica, eólica y bioenergía) (IEA, 2024). Brasil produce bioetanol a partir



Figura 4. Retos y oportunidades de algunas energías renovables. Elaboración propia.

de caña de azúcar desde el programa Proálcool de los años setenta y aprovecha el bagazo en cogeneración. En paralelo, el noreste suma más de 30 GW eólicos gracias a subastas públicas y a contratos de largo plazo con precios competitivos (GWEC, 2026). El caso muestra cómo un marco regulatorio estable y una política agrícola alineada habilitan el despliegue masivo de biocombustibles y de fuentes variables de manera complementaria.

Colombia: marco normativo y despliegue reciente de renovables no convencionales

La generación colombiana fue tradicionalmente hidroeléctrica, pero la vulnerabilidad ante los fenómenos de El Niño impulsó la diversificación. La Ley 1715 de 2014 (Congreso de la República de Colombia, 2014) creó incentivos tributarios y administrativos para fuentes no convencionales, y las subastas de contratos de largo plazo desde 2019 adjudicaron más de 10 GW de proyectos solares y eólicos, principalmente en La Guajira (UPME, 2023). El caso ilustra cómo subastas bien diseñadas pueden acelerar la entrada de fuentes de energía renovables variables en sistemas previamente dominados por una sola fuente.



precios récord a nivel mundial para energía solar y eólica; sin embargo, su suspensión desde 2019 y los cambios regulatorios subsecuentes han frenado el ritmo: la participación de las energías limpias en la generación se mantiene en torno al 24 %, lejos de la meta (SENER, 2024).

En bioenergía, México dispone de un potencial técnico considerable a partir de residuos agrícolas (bagazo de caña, rastrojos), pecuarios y urbanos, con proyectos de biogás en las industrias tequilera, porcícola y lechera; sin embargo, la fracción es minoritaria por la falta de un marco regulatorio específico para biogás y biocombustibles avanzados, tarifas que reconozcan la valorización de residuos y eslabones logísticos de recolección y acopio. Cerrar estas brechas mediante normas para la inyección de biometano a la red, esquemas de compra pública preferente y apoyos focalizados a pequeños productores constituyen algunas de las principales áreas de oportunidad para acelerar la transición energética del país.

Estándares de cartera renovable

Instrumento de política que obliga a las empresas suministradoras de electricidad a generar u obtener un porcentaje mínimo de su energía a partir de fuentes renovables.

Financiamiento verde

Recursos económicos (créditos, bonos o inversiones) destinados específicamente a proyectos con beneficios ambientales, como las energías renovables o la eficiencia energética.

Las políticas públicas y el estado de la bioenergía en México

La evidencia internacional sugiere que la velocidad de la transición depende menos del recurso disponible que del marco de las políticas públicas: incentivos fiscales, tarifas de alimentación garantizadas, subastas competitivas de largo plazo, **estándares de cartera renovable** y **financiamiento verde**. La discontinuidad o reversión de estas herramientas se traduce, de manera consistente, en una desaceleración de las inversiones.

México cuenta con un recurso solar, eólico y de biomasa excepcional. La Ley de Transición Energética estableció como meta que, al 2024, al menos el 35 % de la generación eléctrica debería provenir de fuentes limpias e introdujo los Certificados de Energías Limpias y las subastas eléctricas de largo plazo (DOF, 2015). Las subastas de 2016 y 2017 lograron

Conclusión

Las energías renovables son esenciales para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. En 2024, el 91 % de la nueva capacidad renovable a escala de servicios públicos generó electricidad por debajo del costo de la alternativa fósil más barata, lo que evitó 467 000 millones de dólares en costos de combustibles fósiles a nivel mundial (IRENA, 2025a). Los casos de Alemania, Uruguay, Brasil y Colom-

bia muestran que el compromiso gubernamental y las políticas adecuadas hacen viable la transición. Para México, restablecer la continuidad de la política energética y desarrollar instrumentos específicos para la bioenergía son condiciones para acelerar el avance y aprovechar el potencial nacional.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Conahcyt por la beca de manutención otorgada a O. D. Lara Montaña para sus estudios posdoctorales, y al Grupo Procesos de Investigación de Producción de Bioproductos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro por su apoyo en este trabajo.

Óscar Daniel Lara Montaña

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro.
oscar.lara@uaq.mx

Claudia Gutiérrez Antonio

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro.
claudia.gutierrez@uaq.mx; claugtez@gmail.com

Manuel Toledano Ayala

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro.
toledano@uaq.mx

Referencias específicas

- Al-Shetwi, A. Q. (2022), "Sustainable development of renewable energy integrated power sector: Trends, environmental impacts, and recent challenges", *Science of the Total Environment*, 822:153645. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153645>.
- Congreso de la República de Colombia (2014), "Ley 1715 de 2014 por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional", *Diario Oficial No. 49.150*, Bogotá. Disponible en: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57353>, consultado el 27 de mayo de 2026.
- DOF (2015), "Ley de Transición Energética", *Diario Oficial de la Federación*, Secretaría de Gobernación, México [en línea]. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5421295, consultado el 27 de mayo de 2026.
- GWEC (2026), *Global Wind Report 2026*, Global Wind Energy Council, Bruselas. Disponible en: <https://www.gwec.net/reports/globalwindreport/>, consultado el 22 de abril de 2026.
- IEA (2024), *World Energy Outlook 2024*, International Energy Agency [en línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>, consultado el 27 de mayo de 2026.
- IRENA (2025a), *Renewable Power Generation Costs in 2024*, International Renewable Energy Agency [en línea]. Disponible en: <https://www.irena.org/Publications/2025/Jun/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2024>, consultado el 27 de mayo de 2026.
- IRENA (2025b), *Renewable Capacity Statistics 2025*, International Renewable Energy Agency [en línea]. Disponible en: <https://www.irena.org/Publications/2025/Mar/Renewable-capacity-statistics-2025>, consultado el 27 de mayo de 2026.
- Jaeger, J. (2023), *These 8 Countries Are Scaling Up Renewable Energy the Fastest*, World Resources Institute [en línea]. Disponible en: <https://www.wri.org/insights/countries-scaling-renewable-energy-fastest>, consultado el 27 de mayo de 2026.
- Rechsteiner, R. (2021), "German energy transition (Energiewende) and what politicians can learn for environmental and climate policy", *Clean Technologies and Environmental Policy*, 23(2):305-342. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01939-3>.
- SENER (2024), *Reporte de avance de energías limpias. Segundo semestre 2023*, Secretaría de Energía [en línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/sener/articulos/reportes-de-avance-de-energias-limpias>, consultado el 27 de mayo de 2026.
- UPME (2023), *Plan de expansión de referencia generación-transmisión 2022-2036*, Unidad de Planeación Minero-Energética [en línea]. Disponible en: <https://www.upme.gov.co/>, consultado el 27 de mayo de 2026.

Jorge Luis Rosales López, Mauricio Olivares Luna e Iván Enrique Campos Silva



La borurización: una técnica para aumentar la vida útil de los metales y reducir residuos ambientales

Resumen

Se examina la evolución del tratamiento de borurización, el cual aumenta la durabilidad de los metales y reduce los residuos ambientales. Iniciamos con un repaso histórico del caso del Iron Bridge, primer puente metálico del mundo, construido en 1779, que enfrentó desafíos significativos de oxidación y corrosión. Desde entonces, los avances en la ciencia de materiales han permitido desarrollar técnicas como el borurado por empaquetamiento de polvo, que enriquece la superficie metálica con átomos de boro para aumentar su vida útil.

Abstract

This article examines the evolution of boriding, a treatment that increases the durability of metals and helps reduce environmental waste. It begins with a historical overview of the Iron Bridge, the world's first metal bridge, built in 1779, which faced major problems of oxidation and corrosion. Since then, advances in materials science have led to techniques such as powder-pack boriding, which enriches metal surfaces with boron atoms to extend their service life.

Recientemente, el Grupo de Ingeniería de Superficies del Instituto Politécnico Nacional ha innovado con la borurización en caja asistida por corriente directa pulsante (BCDP), que utiliza corriente eléctrica para acelerar la formación de capas de boruro, disminuyendo el tiempo y los residuos generados. Mediante un experimento casero se ilustra cómo la corriente eléctrica puede optimizar el proceso, subrayando el impacto positivo de esta técnica en la conservación de recursos y protección del ambiente.



 El problema de la oxidación y los desperdicios metálicos

 ¿Te has preguntado alguna vez cómo podemos hacer que los metales duren más tiempo sin oxidarse? Actualmente, investigadores, industrias y gobiernos buscan soluciones para preservar el medio ambiente y nuestro planeta.

La siguiente anécdota ilustra cómo el cuidado y la mejora de las propiedades de los metales pueden contribuir a este objetivo. En 1779, en Shropshire, Inglaterra, se construyó el primer gran puente de hierro fundido del mundo, conocido como Iron Bridge, sobre el río Severn. Este puente no sólo constituyó un avance monumental en la ingeniería, sino que también simbolizó la capacidad humana de moldear materiales para el beneficio social. Sin embargo, al paso de los años, enfrentó desafíos como la oxidación y la corrosión, debido al contacto con la humedad y con el aire, hasta que, finalmente, en 1934 se prohibió el paso de vehículos por él y en 1950 ya nadie volvió a cruzar el puente.

Una preocupación global actual es la generación de residuos. En México, por ejemplo, la acumulación de desechos metálicos es especialmente alarmante. De acuerdo con el indicador “Residuos sólidos urbanos generados, por tipo de residuo. Metales (miles de toneladas)” del Banco de Indicadores del INEGI, la generación de residuos metálicos en México aumentó de aproximadamente 1.3 millones de toneladas en 2008 a 1.6 millones en 2017. Estos residuos no sólo representan un reto en términos de gestión, sino que también afectan de manera significativa el medio ambiente.

 Soluciones tradicionales y modernas

 ¿Y si pudiéramos “vacunar” a los metales contra la oxidación? Regresando al ejemplo del Iron Bridge, años después, ingenieros y científicos descubrieron que se podía proteger estructuras similares de la degradación causada por el óxido mediante el tratamiento del hierro con ciertos químicos y técnicas. Al igual que cuidamos una reliquia familiar o un objeto de gran valor personal, el tratamiento de los metales permite extender su vida útil y preservar su integridad para futuras generaciones.

Para enfrentar el problema de la rápida acumulación de residuos metálicos, científicos de todo el mundo investigan cómo mejorar las propiedades de los metales para extender su vida útil y reducir la necesidad de reemplazar herramientas y componentes metálicos con frecuencia. Uno de los métodos clásicos es el borurado por empaquetamiento de polvo (BPP). Este tratamiento, que ha sido objeto de estudio en México desde mediados de la década de los noventa, consiste en enriquecer la superficie metálica con átomos de boro, proceso que genera compuestos conocidos como boruros, que se destacan por incrementar notablemente la resistencia del metal al desgaste y a la corrosión (Campos-Silva y cols., 2009).

El procedimiento del BPP implica situar el metal dentro de un contenedor relleno de un polvo rico en boro y calentar el conjunto a temperaturas que oscilan entre 850 y 1000 °C. A estas altas temperaturas los átomos de boro migran hacia la superficie del metal y crean una capa protectora de boruro. Aunque este método ha probado ser eficaz en diversos metales, como los utilizados en la construcción y en la industria aeroespacial, no está exento de desafíos. El proceso puede durar entre 6 y 24 horas, lo que resulta en un uso ineficiente de los recursos materiales y energéticos.

Para mejorar esta técnica, investigadores de todo el mundo han implementado distintas fuentes de energía. Algunas técnicas de borurado no sólo dependen de la temperatura, sino también de la energía eléctrica. Por ejemplo, el Grupo de Ingeniería de Superficies (GIS) del Instituto Politécnico Nacional (IPN) en México ha creado una técnica avanzada llamada borurización en caja asistida por corriente directa pulsante (BCDP). Esta nueva técnica utiliza corriente eléctrica durante la difusión del boro a alta temperatura, lo que reduce drásticamente el tiempo necesario para formar la capa de boruro (Campos-Silva y cols., 2021).

 Experimento casero para entender el papel de la electricidad en el borurado

 Para entender cómo la aplicación de la corriente eléctrica mejora la eficiencia del tratamiento y acor-



ta el tiempo de formación de una capa protectora de boruros, el lector puede realizar un experimento en casa. Necesitará objetos cotidianos como una cuchara, dos vasos de cristal llenos con agua hasta las tres cuartas partes y colorante vegetal oscuro. Si tiene un gotero para el colorante, mucho mejor. También necesitará un cronómetro, que puede ser un reloj de mano o un teléfono inteligente.

Para comenzar, hay que colocar el primer vaso en una superficie plana y esperar por un minuto para asegurarse de que el agua esté completamente quieta. Después de ese minuto, hay que acercar el colorante justo sobre la superficie del agua, sin tocarla, y dejar caer unas gotas dentro del vaso. El tiempo que tarda el colorante en dispersarse completamente y llegar al fondo del vaso en este experimento es muestra de un proceso conocido como difusión, que es bastante lento y, podría decirse, **estocástico**. Puede verse que el colorante no se va directamente al fondo, sino que se mueve en varias direcciones, probablemente tocando las paredes del vaso antes de llegar al fondo.

A continuación, hay que tomar el segundo vaso y repetir el procedimiento, pero esta vez, antes de añadir el colorante, se debe agitar el agua suavemen-

te con la cuchara, creando un movimiento circular durante unos 10 segundos. Al tomar el tiempo que tarda el colorante en llegar al fondo, se verá que la dispersión es mucho más rápida debido al movimiento. Esto nos ayuda a comprender por qué la agitación actúa como una fuerza que guía y acelera el proceso de difusión, similar a la del campo eléctrico que impulsa los átomos de boro hacia la superficie del material en la técnica de BCDP.

Este fenómeno es similar a lo que sucede en la borurización asistida por corriente directa pulsante, donde el campo eléctrico funciona como una fuerza que impulsa los átomos de boro hacia la superficie del material acelerando el proceso y, por lo tanto, reduciendo el tiempo y los residuos generados en comparación con otros métodos de borurado.

■ **Del borurado tradicional al borurado con asistencia eléctrica: los últimos 30 años**

■ Como mencionamos, el borurado es un proceso que ha demostrado ser muy útil para mejorar las propiedades mecánicas de los materiales metálicos. En México, el primer experimento no se hizo con polvos, sino con una pasta especial. En 1997, Meléndez y su equipo evaluaron cuatro materiales metálicos expuestos a este proceso. Ellos observaron que el tratamiento resultaba en una capa de boruros muy dura, especialmente en aquellos aceros con menos elementos aleantes. Además, estas capas protegían al material del desgaste mucho mejor que cualquier tratamiento térmico usado en aquel entonces.

Avanzamos hasta 2009, cuando por primera vez en México se experimentó con polvos especiales para introducir átomos de boro en un hierro fundido. El equipo estudió cómo crecía la capa de boruros usando un modelo matemático y descubrieron que este crecimiento dependía de factores como la temperatura, el tiempo de exposición al tratamiento y el tipo de metal utilizado (Campos-Silva y cols., 2009).

Avanzando hasta 2019, el equipo de investigación dio un paso innovador al introducir un campo eléctrico durante el proceso de borurado en una aleación usada para prótesis (Campos-Silva y cols., 2019). Si bien este enfoque revolucionario aceleraba

◀ **Estocástico**
Se refiere a un comportamiento aleatorio e impredecible.

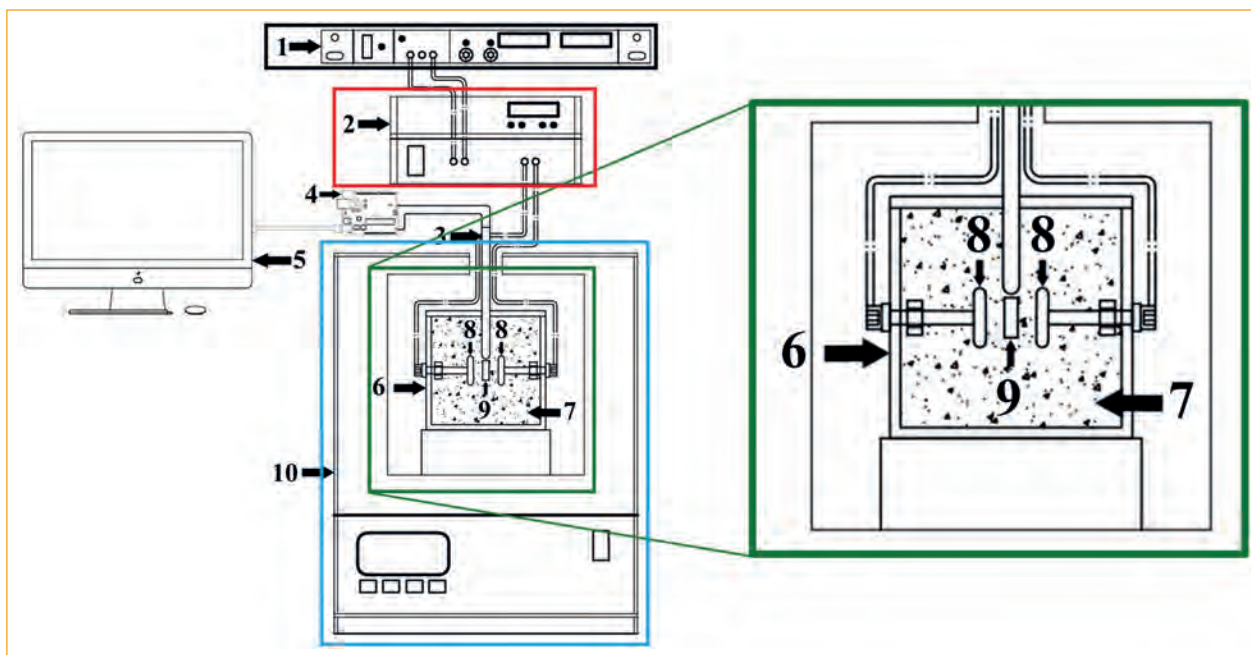


Figura 1. Diagrama esquemático del sistema utilizado en el BCDP: 1) Fuente de alimentación. 2) Dispositivo electrónico de control programable. 3) Sensor de temperatura. 4) Tarjeta de adquisición de datos. 5) Computadora empleada para monitorear los parámetros de proceso. 6) Contenedor de acero inoxidable. 7) Mezcla de polvo borurante. 8) Electrodos. 9) Muestra a tratar. 10) Horno eléctrico para tratamientos térmicos (Olivares-Luna y cols., 2024).

el tratamiento, enfrentaba el desafío de lograr una capa de boruros más uniforme en todo el material. Para conseguirlo, se colocaron electrodos dentro del contenedor del tratamiento a fin de crear una corriente eléctrica, pues se esperaba que este campo eléctrico ayudara a transportar boro hacia la superficie del material, acelerando el crecimiento de la capa protectora de boruros. Sin embargo, se dieron cuenta de que el espesor de la capa no era uniforme debido a la dirección de la corriente eléctrica.

El gran salto ocurrió en 2021, cuando Campos-Silva y su equipo implementaron un dispositivo electrónico que permitió cambiar la dirección del campo eléctrico de manera simétrica durante el tratamiento. Esto aseguró que los átomos de boro se transportaran de manera uniforme a todas las caras del material, logrando un crecimiento rápido y homogéneo de la capa de boruros.

El papel de la ciencia mexicana en la tecnología de la borurización

Imagina un sistema compuesto por cuatro elementos principales: un horno de convección (Figura 1,

en azul), una fuente de alimentación, un contenedor de acero con electrodos (Figura 1, en verde) y un dispositivo de control electrónico (Figura 1, en rojo). Este conjunto representa un importante avance tecnológico y un ejemplo del ingenio mexicano, desarrollado por investigadores del Instituto Politécnico Nacional.

El funcionamiento es fascinante: la fuente de alimentación envía energía eléctrica que es dirigida y controlada por el dispositivo electrónico, que no sólo cambia la dirección de la corriente, sino también protege al sistema de posibles problemas eléctricos. Los electrodos, conectados a través de alambres resistentes a altas temperaturas, ayudan a transmitir la energía necesaria para el proceso químico del borurado dentro del contenedor, que se sitúa en el horno, y mantenerlo a la temperatura adecuada.

¿Qué observarías tú?

En este proceso tiene un papel crucial un fenómeno conocido como electromigración, el cual alude a un movimiento forzado de átomos dentro de un material, debido a la corriente eléctrica. Durante

el borurado, este fenómeno ayuda a que los átomos de boro se transporten hacia el material, donde forman una capa de boruros que protege y fortalece el metal.

Aunque parezca que la corriente eléctrica hace todo el trabajo, es importante recordar que la temperatura del tratamiento es la que realmente controla el proceso. La corriente eléctrica “asiste” a la temperatura, haciendo que el proceso sea más eficiente (Rosales-López y cols., 2025).

¿Te imaginas siendo parte de este emocionante campo de la ciencia de materiales? ¿Qué crees que podríamos mejorar con esta técnica?

Jorge Luis Rosales López

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional.

Jrosalesl1401@alumno.ipn.mx

Mauricio Olivares Luna

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional.

molivaresl1800@alumno.ipn.mx

Iván Enrique Campos Silva

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional.

icampos@ipn.mx

Referencias específicas

- Campos-Silva, I., M. Ortiz-Domínguez, M. Keddam *et al.* (2009), “Kinetics of the formation of Fe₂B layers in gray cast iron: Effects of boron concentration and boride incubation time”, *Applied Surface Science*, 255:9290-9295. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.07.029>.
- Campos-Silva, I., O. Franco-Raudales, J. A. Meda-Campana *et al.* (2019), “Growth Kinetics of CoB-Co₂B Layers Using the Powder-Pack Boriding Process Assisted by a Direct Current Field”, *High Temperature Materials and Processes*, 38:158-167. Disponible en: <https://doi.org/10.1515/htmp-2018-0013>.
- Campos-Silva, I., E. J. Hernández-Ramírez, A. Contreras-Hernández *et al.* (2021), “Pulsed-DC powder-pack boriding: Growth kinetics of boride layers on an AISI 316 L stainless steel and Inconel 718 superalloy”, *Surface and Coatings Technology*, 421:127404. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127404>.
- Castillo-Vela, L. E., I. Mejía-Caballero, J. L. Rosales-López *et al.* (2023), “The influence of a pulsed-DC field on the growth of the Fe₂B layer and the electrical behavior of the boriding media”, *Vacuum*, 210:111846. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.111846>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (s. f.), “Residuos sólidos urbanos generados, por tipo de residuo. Metales (Miles de toneladas)”, *Banco de Indicadores*, Estados Unidos Mexicanos, 2008-2017. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/indicadores/>, consultado el 7 de mayo de 2026.
- Meléndez, E., I. Campos, E. Rocha y M. A. Barrón (1997), “Structural and strength characterization of steels subjected to boriding thermochemical process”, *Materials Science and Engineering A*, 234-236:900-903. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(97\)00389-4](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00389-4).
- Olivares-Luna, M., J. L. Rosales-López, L. E. Castillo-Vela *et al.* (2024), “Insights on the Pulsed-DC Powder-Pack Boriding Process: The role of the electric charge on the growth of the boride layer and the semiconductor behavior of the boriding media”, *Surface and Coatings Technology*, 480:130588. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130588>.
- Rosales-López, J. L., M. Olivares-Luna, L. E. Castillo-Vela *et al.* (2025), “Insights on the Pulsed-DC Powder-Pack Boriding Process: Effect of current density and electric field implications on the FeB and Fe₂B growth kinetics”, *Surface and Coatings Technology*, 502:131965. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2025.131965>.

José Luis Álvarez García

El Museo y la Biblioteca de Alejandría

Resumen

Alejandría fue fundada a orillas del río Nilo en el año 331 a. n. e. por Alejandro Magno. En esta ciudad se da uno de los encuentros más afortunados entre diversas civilizaciones. Los reyes Ptolomeo I y Ptolomeo II, grandes protectores de las ciencias y las artes, erigieron el Museo y la Biblioteca en donde aparecen obras de grandes personajes que constituyen los cimientos de la historia humana.

Abstract

Alexandria was founded on the banks of the Nile River in 331 BCE by Alexander the Great. This city witnessed one of the most fortunate encounters between different civilizations. Kings Ptolemy I and Ptolemy II, great patrons of the sciences and arts, erected the Museum and the Library, where the works of great figures were concentrated, forming the foundations of human history.

Introducción

En el siglo IV a. n. e., con las invasiones macedonias al mando de Alejandro Magno, la preponderancia intelectual y cultural de Atenas se traslada a la ciudad de Alejandría, fundada en Egipto en el año 331 a. n. e. por el conquistador macedonio. Por todo el territorio conquistado por Alejandro Magno se fundaron muchas ciudades con su nombre, de las que la más famosa es la establecida en la desembocadura del río Nilo en Egipto. Los griegos llamaron a esta ciudad *Alexandreia He pros Aigypto* (en latín *Alexandria ad Aegyptum*), nombre que da cuenta de su localización en uno de los extremos de Egipto. La fundación de esta ciudad marca el inicio de una era completamente distinta a la precedente, desarrollada en Atenas. La ciudad de Alejandría representa el inicio del periodo conocido como época helenística o alejandrina. El desarrollo de esta ciudad es el resultado de uno de los más afortunados encuentros de la historia entre diversas civilizaciones.





Figura 1. Alejandro Magno, detalle de un mosaico antiguo.

Alejandro murió en Babilonia en 323 a. n. e. y uno de sus generales más íntimos, Ptolomeo, hijo de Lagos, se proclamó rey de Egipto en 304 a. n. e., fundando la dinastía ptolomeica, que duró hasta el año 30 a. n. e. Ptolomeo I Soter, además, fue protector de las ciencias y las artes y escribió la mejor bio-

grafía de Alejandro Magno. A su muerte en el año 283 a. n. e., le sucedió Ptolomeo II Filadelfo, que reinó hasta 246 a. n. e. y continuó la obra de su padre. Estos reyes hicieron posible el renacimiento alejandrino durante la primera mitad del siglo III a. n. e.

Para crear la nueva civilización de Alejandría, tal y como señala el historiador George Sarton en su libro *Ciencia antigua y civilización moderna*, fue necesaria la colaboración de muchos personajes; no solamente soldados y comerciantes, sino también intelectuales de diversa índole: administradores, filósofos, ingenieros, arquitectos, maestros, poetas, artistas y hombres de ciencia. Ptolomeo I encargó el trazado de Alejandría a Dinócrates de Rodas, el arquitecto más eminente de la época. Otro arquitecto, Sóstrato de Cnido, construyó un faro en una isleta del puerto; la isla se llamaba Faros y por eso la construcción recibió ese nombre. Fue el primer faro conocido, era una torre de unos 120 metros de altura, visible desde todas direcciones a gran distancia. Fue tan famoso que figuró en la lista de las siete maravillas del mundo.

El Museo y la Biblioteca

Las dos instituciones que mejor pusieron de manifiesto la grandeza de la cultura alejandrina fueron el Museo y su Biblioteca. La palabra *museo* significa, de acuerdo con su etimología, “lugar de las musas”. Pero este lugar era de un tipo totalmente diferente de los muchos museos que había habido con anterioridad. Si se intentara describirlo con palabras modernas, sería lo más cercano a un centro de investigación científica. Es muy probable que hubiera dormitorios para los hombres de ciencia, ayudantes y discípulos, salas para las asambleas, recintos cubiertos para el estudio y la discusión al aire libre; había también un jardín zoológico y otro botánico. Al Museo acudían reconocidos eruditos, poetas y filósofos que eran aceptados y recibían generosos salarios, comida y alojamiento, quedando además exentos del pago de impuestos. Según G. Sarton, tanto el Museo como la Biblioteca estaban dentro del recinto real y eran instituciones reales, de modo que toda la actividad



Figura 2. Ciudades fundadas por Alejandro Magno.



Figura 3. Estratón, discípulo de Teofrasto y Aristóteles.

se desarrollaba a expensas del monarca. El Museo y la Biblioteca eran bienes públicos.

Es muy probable que la Biblioteca haya dependido del Museo. El desarrollo científico de estas dos instituciones se debió fundamentalmente a sus reales patrocinadores, pero más todavía a Estratón, quien fue mandado llamar por el primero de los Ptolomeos alrededor del año 300 a. n. e. Estratón (c. 335 a. n. e.-c. 269 a. n. e.) fue discípulo de Teofrasto, en ese entonces director del Liceo en Atenas, quien a su vez fue discípulo directo de Aristóteles. A Estratón le interesaba profundamente el estudio de la naturaleza, al grado de que lo bautizaron con el sobrenombre de *Ho physikos*, el físico. Bajo su dirección se desarrollaron la física, la astronomía, la geometría y la ingeniería. Estratón vivió alrededor de 12 años en Egipto hasta que lo reclamaron en Atenas a la muerte de Teofrasto, en 288 a. n. e. Hay así una línea de continuidad entre el Liceo aristotélico y la fundación del Museo alejandrino.

Hay que señalar que un cargo de suma importancia fue el de bibliotecario. El primer organizador de la colección de libros fue Demetrio de Falero. Luego estuvo Zenodoto de Éfeso, quien primero identificó los rollos y después reunió y ordenó los que pertenecían a una misma obra; por ejemplo, los rollos de la *Ilíada* y la *Odissea*. Él fue, de hecho, el primer “editor” de esos poemas épicos. Calímaco de Cirene, poeta y erudito, además de filólogo, llegó a Alejandría a mediados del siglo III a. n. e. y le encargaron la elaboración del catálogo de la Biblioteca, el *Pinakes* (Πινάκες). En este catálogo estaban expuestos los títulos de todas las obras que ahí se guardaban, clasificadas en las siguientes categorías: documentos legales, épica, retórica, tragedia, comedia, poesía lírica, historia, medicina, matemáticas, ciencias naturales y miscelánea. Era un catálogo muy extenso, del cual desgraciadamente se perdió una parte significativa.

Es importante señalar el valor que los reyes alejandrinos le dieron a la conservación de la cultura y el conocimiento. Irene Vallejo nos narra, en su libro *El infinito en un junco*, cómo se enviaban expediciones desde Alejandría a recorrer el mundo conocido en esa época para comprar y adquirir libros de regiones distantes de Egipto. Es famoso también el episodio cuando pidieron en préstamo a Atenas las colecciones de los dramaturgos Esquilo, Sófocles y Eurípides para copiarlas, dejando en garantía la cantidad de 15 talentos. (Hay quien dice que equivalían al valor de 450 kg de oro.) Una vez copiados los textos, Ptolomeo Soter consideró que las colecciones originales valían mucho más que el depósito y regresó las copias conservando los originales, dejando en Atenas el depósito.

Una rama del conocimiento que se desarrolló en este periodo fue la de las investigaciones anatómicas. A Herófilo de Calcedonia se le atribuye un ambicioso programa de investigación anatómica basado en la disección, por lo que puede ser considerado el primer anatomista científico. Vivió en tiempos de Ptolomeo Soter y su obra la continuó Erasístrato de Queos, quien prestó mucha atención a la fisiología.

Tanto el Museo como la Biblioteca tuvieron su edad de oro durante los dos primeros siglos a partir de su fundación. La Biblioteca llegó a tener muchísi-

ma importancia por sí misma hasta el siglo II a.n.e., cuando cayó en una especie de letargo. En la época de su apogeo se calcula que alcanzó a tener alrededor de 400 000 documentos en forma de rollos. Por otra parte, en lo que respecta al Museo, fueron numerosos los logros durante sus primeros siglos de existencia, en los que se cultivaron muchas ramas del saber. Agotar en la extensión de un artículo todas las actividades y personajes que trabajaron en el Museo y la Biblioteca es imposible. Por ello, este trabajo se concentrará en la astronomía, la física, la ingeniería y las matemáticas. Además de los personajes ya mencionados, están los que destacaron en estos campos, cuya lista es extensa y cuyas obras forman parte de los cimientos de la civilización humana.

El primero es Euclides (c. 325 a. n. e.-c. 265 a. n. e.). Se conoce muy poco de su vida personal. Se sabe que se educó en Atenas y su aprendizaje de matemáticas debió haberlo realizado en la Academia. Vivió en Alejandría y trabajó bajo la protección de los dos primeros Ptolomeos. Euclides parece no haber estado ligado oficialmente al Museo, ya que no existe ningún registro que lo pruebe. Sin embargo, conoció con toda seguridad el Museo y la Biblioteca y debió haber realizado actividades de enseñanza. La obra más famosa de Euclides se conoce como los

Elementos, consta de trece libros y es el más antiguo manual de geometría que ha llegado hasta nosotros. Constituye un modelo universal en lo que respecta al estricto orden axiomático-deductivo en que están expuestas todas sus proposiciones. Es importante también el llamado quinto postulado, fundamental en la construcción de las geometrías no euclidianas y la física moderna. Si bien no hay mucha información sobre su vida personal, existe una anécdota que posee validez universal. Se dice que Ptolomeo I, quien tenía muchas dificultades para entender los teoremas geométricos, le preguntó un día si no había un camino más corto que el de los *Elementos*, a lo que Euclides contestó que no existía un *camino real* hacia la geometría.

Después se encuentra Aristarco (c. 310 a. n. e.-c. 230 a. n. e.), quien nació en la isla de Samos, colonia griega en el Asia Menor. Astrónomo y matemático, fue el primero en proponer el modelo heliocéntrico, con el Sol en el centro del Universo y la Tierra girando en torno a él. Trabajó en el Museo y la Biblioteca. La única obra de Aristarco que ha llegado hasta nuestros días es *Sobre los tamaños y las distancias del Sol y la Luna*. Realizó cálculos sobre el tamaño y la distancia del Sol y la Luna respecto a la Tierra. Encontró que el Sol era mucho más grande que la Tierra y la Luna, y que la distancia del Sol a la Tierra era mucho más grande que la distancia de ésta a la Luna. Sin embargo, el modelo de Aristarco no prosperó, principalmente por dos razones:

1. El modelo heliocéntrico competía con el modelo geocéntrico de Aristóteles, y la noción de una Tierra fija en el centro del Universo era consistente con la física aristotélica del movimiento; algo que el heliocentrismo no poseía.
2. Si la Tierra se movía alrededor del Sol, debía observarse un corrimiento de paralaje respecto a las estrellas, provocado por el movimiento de la Tierra en su órbita alrededor del Sol; corrimiento que no era observado en absoluto.

Aparece también el que se considera el más grande ingeniero y científico de la Antigüedad, y uno de los más grandes de todos los tiempos: Arquímedes

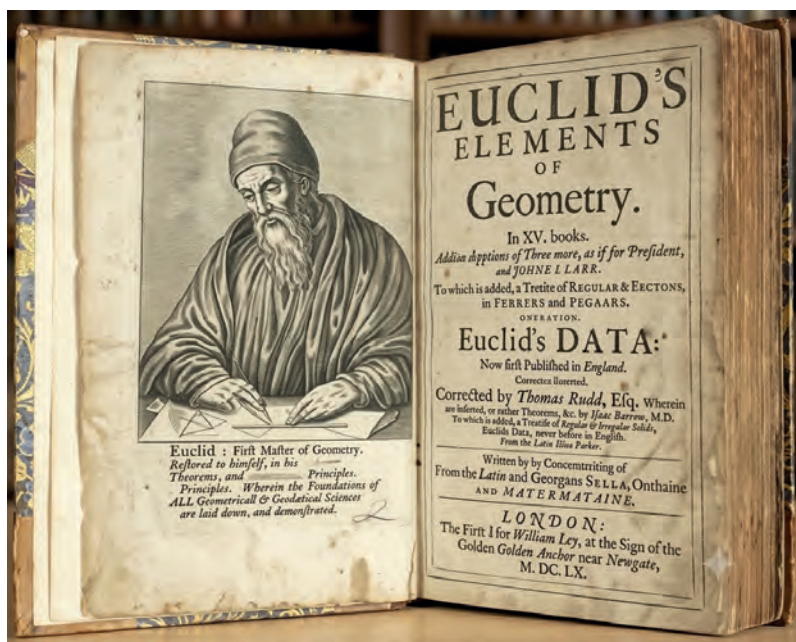


Figura 4. Los *Elementos*, de Euclides (Londres, 1660).

(287 a. n. e.-212 a. n. e.). Nació en la ciudad de Siracusa, en la isla de Sicilia. El propio Galileo Galilei, que basó mucho de su obra en la del genio de Siracusa, se refiere a él como el “Divino Arquímedes”. Realizó aportaciones fundamentales en los campos de las matemáticas, la física y la ingeniería. Algunas de sus obras son *Sobre la esfera y el cilindro*, *El contador de arena* y *Sobre los cuerpos flotantes*; esta última contiene los principios de la hidrostática. Encontró el valor del número π hasta varios decimales. En el terreno de la ingeniería, construyó aparatos en los que utilizaba la palanca y el tornillo que lleva su nombre, así como la catapulta y el polipasto o sistema de poleas. En Alejandría conoció las obras de los grandes matemáticos de la época. Cuando él llegó, alrededor del año 243 a. n. e., Euclides había muerto hacía poco. Fue discípulo del astrónomo Conón de Samos y estrechó relaciones de amistad y de trabajo con Eratóstenes.

Después de su estancia en Alejandría, regresó a Sicilia, donde trabajó bajo la protección del tirano Hierón II. Es aquí donde despliega todo su genio. La leyenda más famosa en torno a él es aquella donde se relata que el rey le había entregado a un orfebre una barra de oro puro para que le construyera una corona. El rey sospechaba que el orfebre lo había engañado sustituyendo cierta cantidad del oro por algún otro material, como plata o cobre. El rey le encargó a Arquímedes que resolviera el problema, pero con la advertencia de que la corona no podía ser dañada. Es famoso el episodio donde, al descubrir la forma de demostrar el fraude del orfebre, Arquímedes sale desnudo por las calles de Siracusa gritando “¡Eureka!” (“¡Lo hallé!”).

Fue asesinado en el año 212 a. n. e. por uno de los soldados que habían invadido Siracusa. Cicerón encontró su tumba en Agrigento en el año 75 a. n. e., y después de retirar la maleza que la cubría se encontró grabado en la piedra uno de los descubrimientos de Arquímedes: una esfera inscrita en un cilindro, donde el área y el volumen de la esfera son $2/3$ de los del cilindro.

Gran amigo de Arquímedes fue Eratóstenes (276 a. n. e.-194 a. n. e.), con quien mantuvo estrechas relaciones de trabajo. Nació en Cirene. Matemático,

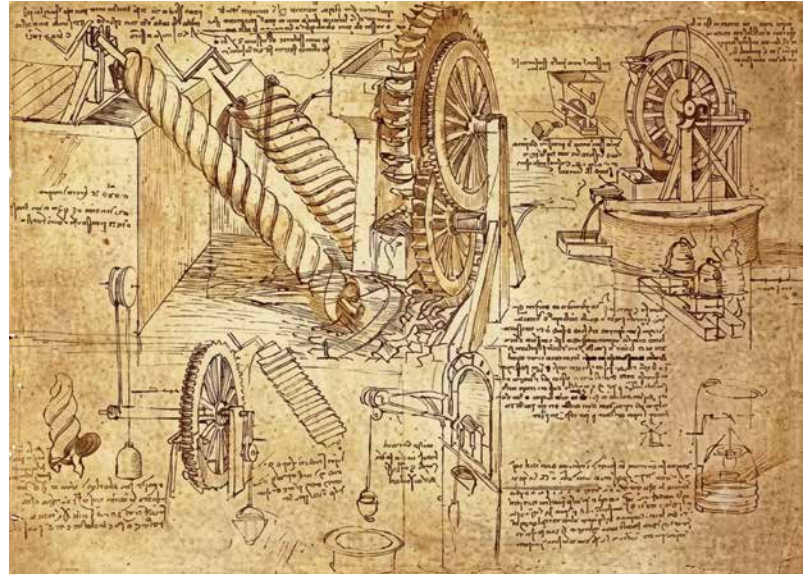


Figura 5. Inventos de Arquímedes.

astrónomo y geógrafo, fue el primero que, con los datos conocidos en la época y midiendo la posición relativa del Sol en Alejandría y Siena (actualmente Aswan), calculó la circunferencia de la Tierra con gran precisión. También fue el primero en calcular la inclinación del eje de la Tierra de manera precisa. Eratóstenes inventó la esfera armilar para sus observaciones astronómicas, instrumento que se siguió utilizando hasta el siglo XVII. Asimismo, dibujó el primer mapa del mundo incorporando paralelos y meridianos basados en el conocimiento de la época. Concibió la geografía como una disciplina sistemática, desarrollando una terminología que se usa en la

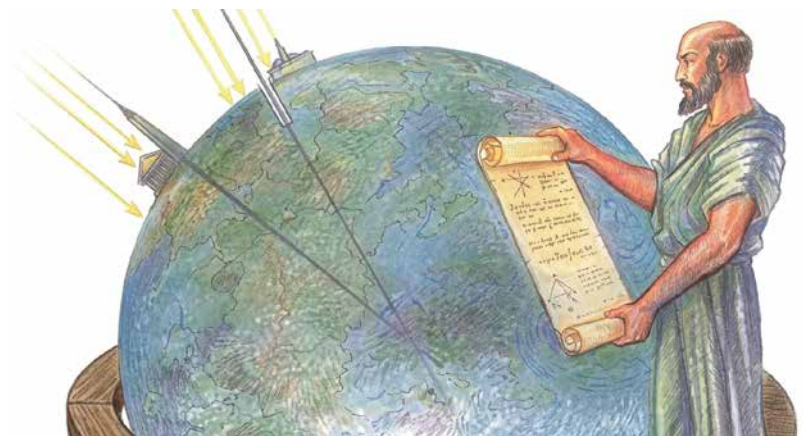


Figura 6. Eratóstenes.

actualidad. Estudió un tiempo en Atenas y trabajó en Alejandría. En el año 236 a. n. e. Ptolomeo III lo llamó para que se hiciera cargo de la Biblioteca.

Nacido en la ciudad de Perge, aparece el matemático y astrónomo Apolonio (c. 262 a. n. e.-c. 190 a. n. e.), de quien se dice que fue discípulo de Euclides. Su obra más famosa es *Sobre las secciones cónicas*—donde da nombre y estudia la elipse, la parábola y la hipérbola—, la cual consta de ocho libros. Ptolomeo Filadelfo lo nombró tesorero general y estudió y enseñó en el Museo y la Biblioteca. Apolonio también escribió un libro sobre *Las tangencias* o *Los contactos*, hoy perdido, pero es mencionado por Pappus. En el campo de la astronomía, se le atribuye la introducción de las órbitas excéntricas y epiciclos para explicar los movimientos planetarios.

Más adelante aparece Hiparco (c. 190 a. n. e.-c. 120 a. n. e.). Astrónomo y matemático, nació en Nicea (hoy territorio de Turquía). Estuvo en el Museo y la Biblioteca y es considerado el más grande astrónomo observacional de la Antigüedad. Casi todas sus obras han desaparecido, pero se conoce mucho de su trabajo a través de Claudio Ptolomeo, quien lo cita con frecuencia. Hiparco desarrolló el modelo de Apolonio de deferentes y epiciclos e introdujo los epiciclos menores y las excéntricas. El astrónomo Claudio Ptolomeo (no relacionado con

los gobernantes Ptolomeos), casi tres siglos después, construyó una gran tradición del conocimiento astronómico basada en la obra de Hiparco. La lista de aportaciones de este último a la astronomía es extensa: elabora el primer catálogo de estrellas con las posiciones de 850 estrellas; divide el día en 24 horas; descubre la precesión de los equinoccios; mide con gran precisión la distancia Tierra-Luna; inventa la trigonometría; construye instrumentos de medición astronómica que sólo son mejorados hasta la época de Tycho Brahe en el siglo xvi.

Como ya se mencionó, la época de oro del Museo y la Biblioteca aconteció durante los dos primeros siglos a partir de su fundación. Sin embargo, la tradición del conocimiento que nació ahí fue tan poderosa que siguió teniendo impacto durante algunos siglos más; sobre todo en la astronomía y las matemáticas.

Claudio Ptolomeo (87 o 100-170) fue un astrónomo y matemático griego del que se conoce muy poco de su vida personal. Probablemente nació en Egipto y murió en Alejandría. En su obra resulta patente la importancia de la tradición helenística en astronomía y matemáticas. Sus dos principales obras son la *Geografía* y el *Almagesto*.

El título griego original del *Almagesto* es *Mathematike Syntaxis* (*Sintaxis matemática*). El nombre *Almagesto* se deriva del superlativo griego *megiste* (*grandísima*) y el artículo árabe *Al*. Es un tratado de astronomía matemática. Está basado en la cosmología aristotélica de una Tierra inmóvil en el centro del Universo. Claudio Ptolomeo desarrolla su obra a partir de la de Hiparco; incluso es difícil saber qué parte es de Hiparco y cuál del propio Ptolomeo.

El *Almagesto* es una recopilación sistemática de toda la astronomía antigua y representó el primer tratado matemático que daba una explicación completa, detallada y cuantitativa de todos los movimientos celestes. Ptolomeo fue el último gran astrónomo de la escuela alejandrina. Construyó una obra que perduró durante cerca de un milenio y medio. El *Almagesto* continuó siendo la biblia de la astronomía hasta comienzos del siglo xvii.

En su época de esplendor, a mediados del siglo iii a. n. e., la Biblioteca era tan grande que Ptolomeo I



Figura 7. Hiparco.

mandó construir una sucursal llamada *Serapeum*, en honor del dios Serapis, la cual adquirió fama propia, sobre todo en los tiempos romanos (Egipto era una provincia romana desde el año 30 a. n. e.). El siglo II marca el final de la edad de oro del Imperio romano y coincide con el inicio del ascenso del cristianismo, el cual combatió todos los centros de paganismo.

Entonces el *Serapeum* se convirtió en la biblioteca principal y se constituyó en el último refugio del paganismo. La tradición griega se mantuvo viva en este lugar todavía por algún tiempo, gracias al trabajo de matemáticos y astrónomos ilustres como Pappus, Teón e Hipatia.

La ciencia griega, nacida en las costas de Asia Menor y que floreció en Atenas y Alejandría, fue expulsada por el cristianismo ortodoxo hacia el Oriente. Fueron los paganos y los cristianos heréticos, principalmente nestorianos y monofisitas, los encargados de difundir la ciencia griega por Asia, desde donde habría de volver a Occidente para convertirse en los cimientos de la ciencia moderna.

José Luis Álvarez García

Departamento de Física, Facultad de Ciencias, UNAM.

josel.alvarezgarcia@gmail.com

Lecturas recomendadas

Crowe, M. J. (2001), *Theories of the World from Antiquity to the Copernican Revolution*, 2.^a ed., Nueva York, Dover Publications.

Heath, T. L. (1991), *Greek Astronomy*, Londres, Dover Publications.

Kuhn, T. S. (1978), *La revolución copernicana. La astronomía planetaria en el desarrollo del pensamiento occidental*, México, Ariel.

Sarton, G. (1960), *Ciencia antigua y civilización moderna*, México, Fondo de Cultura Económica, Breviarios.

Vallejo, I. (2021), *El infinito en un junco*, Barcelona, Penguin Random House.



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

La contribución de la Universidad Autónoma Metropolitana a este número temático sobre el dengue suma tres artículos con enfoque multidimensional e innovador, donde la salud pública se entrelaza con el rigor de las ciencias. En el texto de Roberto Bernal, se propone un acercamiento hacia el control de esta arbovirosis a través de una amalgama de innovadores y complejos modelos matemáticos para adelantarse a la propagación de brotes. En el artículo del grupo de Gustavo Cruz-Bello se enfatiza el entrelazamiento del cambio climático y el daño al medio ambiente con la progresión creciente de la enfermedad; se propone un interesante enfoque hacia el análisis regional del riesgo. Finalmente, en el grupo de Eduardo González Zamora se propone el desarrollo de herramientas moleculares para frenar el avance del virus del dengue dentro del cuerpo humano. La UAM se suma a los esfuerzos nacionales dirigidos al control de esta compleja enfermedad infecciosa.

En este número la UAM también visibiliza un gran ejercicio de conservación y recuperación de ecosistemas realizado por el grupo de Rurik List: la reintroducción y el incremento de manadas de bisonte americano en el norte del país, que ayudan a la restauración de los pastizales.

De este modo, nuestra Universidad mantiene su firme apoyo a la revista *Ciencia* y expone una muestra de su extraordinaria fortaleza en una diversidad de disciplinas.

DR. MARIO DE LEO WINKLER

Director de Comunicación del Conocimiento, UAM



Gustavo Manuel Cruz-Bello, José Mauricio Galeana-Pizaña y Aldo Daniel Jiménez-Ortega



El dengue y el cambio ambiental: una amenaza que crece

Resumen

El dengue es la infección viral transmitida por insectos más extendida del planeta. Su expansión en México está ligada a factores socioambientales, como el aumento de la temperatura, las lluvias y la deforestación, que favorecen a sus transmisores. El riesgo ha crecido a nivel territorial, extendiéndose a zonas más templadas y de mayor altitud debido a cambios en el clima y en el uso del suelo.

Abstract

Dengue is the most widespread insect-borne viral infection on the planet. Its expansion in Mexico is linked to socio-environmental factors such as rising temperatures, rainfall, and deforestation, which favor its transmitters. The risk has grown at a territorial level, extending to more temperate and higher-altitude zones due to changes in climate and land use.

El dengue, un problema creciente

El dengue es la infección viral transmitida por insectos más extendida del planeta. Según la Organización Mundial de la Salud, la mitad de la población mundial corre el riesgo de contagiarse; en particular, quienes habitan en regiones tropicales y subtropicales. Afecta a más de 100 países y a más de 50 millones de personas cada año. En México, principalmente durante la temporada de lluvias, miles de personas enferman y los hospitales reciben a pacientes con fiebre alta, dolor intenso y complicaciones que pueden poner en riesgo la vida si no se tratan a tiempo. Reportes médicos indican que en los últimos años los casos han aumentado de forma importante y, aunque históricamente el dengue se concentraba en regiones tropicales como Veracruz, Chiapas y Tabasco, en tiempos recientes ha comenzado a aparecer en zonas de mayor altitud, como el Estado de México, Puebla e incluso Sonora.

El virus que causa el dengue se transmite principalmente por mosquitos del género *Aedes*. Sin embargo, la distribución geográfica de los mosquitos no explica por sí sola por qué la enfermedad aparece en algunos lugares y no en otros, ni por qué el dengue ha aumentado y se ha extendido a nuevas regiones del país.

■ **El ambiente también enferma**

■ Cuando pensamos en el dengue, normalmente imaginamos mosquitos, piquetes y agua estancada. Sin embargo, la ciencia médica y ecológica demuestra que la propagación de esta enfermedad responde a una escala mucho mayor: la salud de los ecosistemas. El dengue no depende de un único factor, sino de una compleja red de condiciones ambientales en la que los cambios en el uso del suelo y en el clima desempeñan un papel determinante.

Modificar los entornos naturales, ya sea mediante la pérdida de bosques o la expansión urbana y agrícola, altera el equilibrio ecológico, eliminando depredadores naturales del vector y acercando a las poblaciones humanas a los mosquitos. Si a esto sumamos la variabilidad climática global, el riesgo se multiplica. Entender el dengue requiere, por lo tanto, una mirada socioambiental que reconozca que, cuando el territorio se degrada, las condiciones para la transmisión de enfermedades se vuelven propicias.

■ **En busca de la relación ambiente-dengue**

■ Para entender cómo influye el ambiente en la propagación del dengue, realizamos un estudio con datos de casos de dengue en todos los municipios del país, junto con información sobre la temperatura, la lluvia y la pérdida de bosques, de 2010 a 2020.

La información sobre dengue provino de registros hospitalarios, mientras que la de bosques se obtuvo a partir de imágenes satelitales que permiten detectar en qué lugares se ha perdido la cobertura forestal a lo largo del tiempo. También utilizamos datos de temperatura y de precipitación, porque estos factores influyen directamente en la reproducción de los mosquitos transmisores de la enfermedad.

Con toda esta información, elaboramos mapas y utilizamos modelos estadísticos que nos permiten observar cómo varía el riesgo de dengue entre regiones y a lo largo de los años. Con ellos identificamos qué factores están más relacionados con el aumento del dengue y en qué partes del país el riesgo ha crecido más. Es decir, combinamos información sobre la salud, el clima y los cambios en los bosques para entender mejor por qué el dengue se está expandiendo en México.

■ **Así influyen el clima y la deforestación en el dengue en México**

■ En términos generales, cuando un municipio pierde parte de su cobertura forestal, aumenta el riesgo de dengue. Esto ocurre porque la deforestación modifica el ambiente local: cambia la temperatura, la humedad y la forma en que las personas y los mosquitos interactúan en el territorio.

También encontramos que el clima desempeña un papel muy importante. Los años con temperaturas más altas y mayores precipitaciones registran más casos de dengue. La lluvia favorece la formación de charcos y depósitos de agua donde se reproducen los mosquitos, mientras que la temperatura influye en la velocidad a la que estos se desarrollan y transmiten el virus, lo que aumenta el riesgo de epidemia.

■ **Dónde está aumentando el riesgo**

■ Al elaborar mapas de riesgo de distintos años, encontramos que el dengue no se distribuye de manera uniforme en México, sino que existen regiones donde el riesgo es mucho mayor y que, además, ha ido aumentando con el tiempo.

Las zonas de mayor riesgo se concentran principalmente en las regiones tropicales y costeras del país, como la península de Yucatán, la costa del Golfo de México y la del Pacífico. Estas regiones presentan condiciones de temperatura y humedad que favorecen la reproducción del mosquito transmisor del dengue. Sin embargo, los mapas también muestran que el riesgo no se ha mantenido estático, sino que ha cambiado con los años.

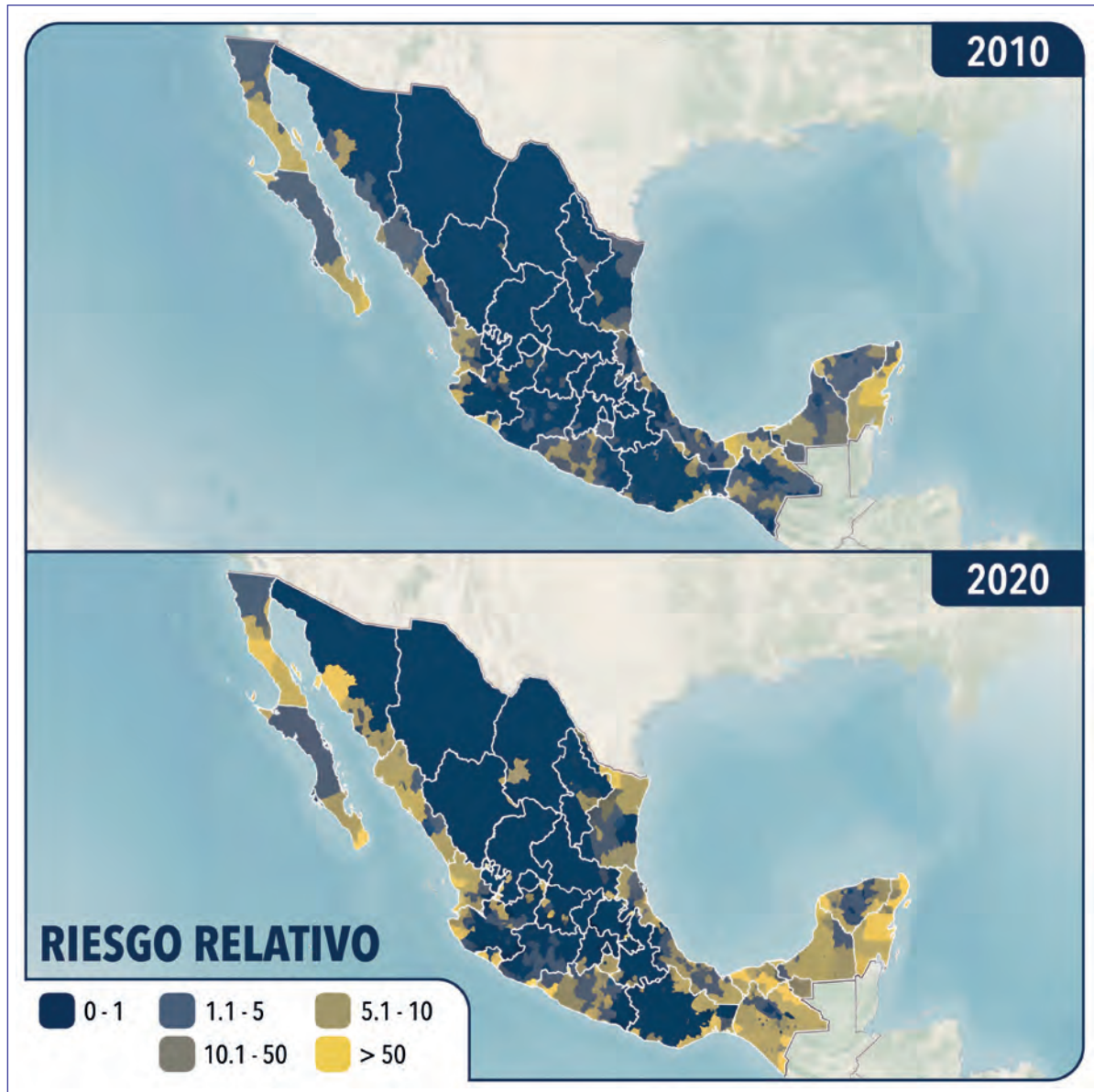


Figura 1. Riesgo relativo de infección por dengue en México en 2010 y 2020. Crédito: Gustavo Manuel Cruz-Bello.

Al comparar los mapas de diferentes periodos, observamos que entre 2015 y 2020 el riesgo de dengue aumentó en muchas regiones del país, incluso en lugares donde antes el problema era menor. Esto sugiere que el dengue se está expandiendo territorialmente, quizá como resultado de los cambios ambientales y territoriales antes mencionados.

Estos mapas identifican las zonas donde la población está más expuesta y en las que las autoridades de salud pueden enfocar sus acciones de prevención, como campañas de limpieza, control de mosquitos

y programas de salud pública. En otras palabras, los mapas de riesgo sirven como herramienta para anticipar dónde pueden ocurrir más casos de dengue en el futuro y para tomar decisiones que reduzcan el impacto de la enfermedad (**Figura 1**).

Conclusión

 El dengue es una enfermedad que depende no sólo de los mosquitos y del virus, sino también del ambiente en el que vivimos. Factores como la temperatura,

la lluvia y la pérdida de bosques modifican geográficamente el riesgo de contagio. Esto nos demuestra que el dengue no debe entenderse únicamente como un problema médico, sino como un desafío socioambiental: la forma en que transformamos la agricultura, tálamos los bosques o expandimos las ciudades influye directamente en la salud humana.

Entender esta compleja relación es fundamental para el futuro, especialmente en un contexto de cambio climático y de transformaciones aceleradas en el uso del suelo. La relevancia de combinar información sobre salud, clima y territorio radica en su aplicación práctica: permite identificar las zonas más vulnerables y diseñar mapas de riesgo para que las autoridades enfoquen sus esfuerzos de prevención de manera más efectiva.

Si queremos reducir el impacto de estas enfermedades, las campañas de salud pública ya no pueden depender únicamente de los hospitales y los medicamentos; deben integrarse con la planificación territorial y el cuidado de los ecosistemas. En última instancia, cuidar el ambiente también es una forma de cuidar nuestra propia salud.

Gustavo Manuel Cruz-Bello

Universidad Autónoma Metropolitana, Cuajimalpa.

gcruz@cua.uam.mx

José Mauricio Galeana-Pizaña

Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial (CentroGeo).

mgaleana@centrogeo.edu.mx

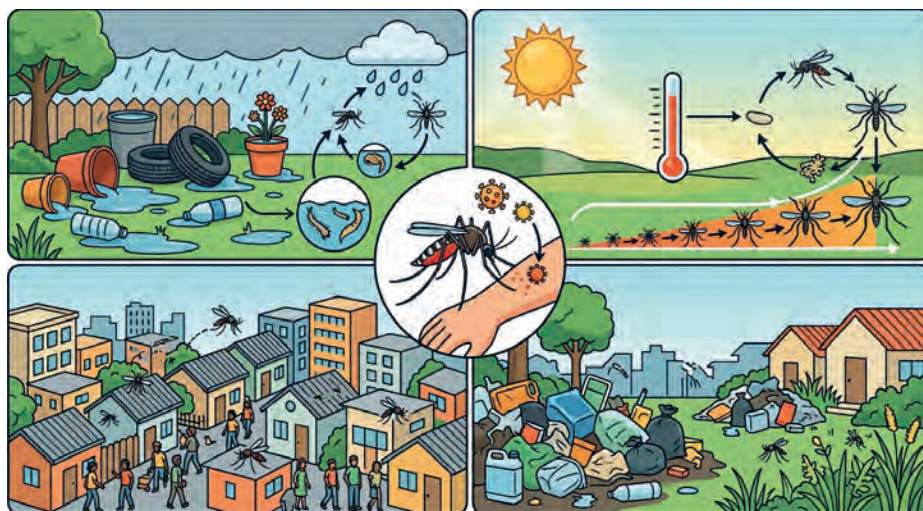
Aldo Daniel Jiménez-Ortega

Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial (CentroGeo).

pd.ajimenez@centrogeo.edu.mx

Lecturas recomendadas

OMS (2023), "Dengue-Región de las Américas", Organización Mundial de la Salud [en línea]. Disponible en: <https://www.who.int/es/emergencias/disease-outbreak-news/item/2023-DON475>, consultado el 2 de junio de 2026.



Yoarhy A. Amador-Sánchez, Alejandro Islas-Jácome y Eduardo González-Zamora



Legos químicos: diseñando armas invisibles contra el dengue

Resumen

El dengue es una enfermedad viral transmitida por mosquitos, principalmente en zonas tropicales. Investigadores de la UAM combaten este reto mediante el uso de reacciones de multicomponentes y herramientas computacionales. Este método permite diseñar moléculas bioactivas o “armas invisibles” para neutralizar virus como el dengue, el zika, el SARS-CoV-2, y otras enfermedades como el cáncer, optimizando recursos.

Abstract

Dengue is a viral disease transmitted by mosquitoes mainly in tropical areas. Researchers from the UAM are tackling this challenge through the use of multicomponent reactions and computational tools. This method allows for the design of bioactive molecules or “invisible weapons” to neutralize viruses like dengue, Zika, SARS-CoV-2, and other diseases like cancer, optimizing resources.

Un enemigo en expansión

El dengue es una enfermedad que va en aumento. Cada año, millones de personas se enferman en distintas partes del mundo, sobre todo en zonas tropicales. Esto se debe, en parte, a que el mosquito que lo transmite, *Aedes aegypti*, se ha expandido debido a factores como el cambio climático, el crecimiento de las ciudades y los viajes entre países. A pesar de los esfuerzos para prevenirlo, el dengue sigue siendo un problema importante de salud. Hoy en día no existen medicamentos ni vacunas realmente efectivos para tratarlo, lo que hace urgente encontrar nuevas soluciones. Pero ¿cómo se puede combatir algo tan pequeño como un virus? La respuesta está, en parte, en la química.

Cuando el virus del dengue entra a nuestro cuerpo, invade nuestras células y las utiliza como si fueran una fábrica para producir más virus. Para lograrlo, necesita ciertas “herramientas” internas. Una de las más importantes es una especie de “tijera molecular” llamada NS3. Esta herramienta le permite al virus cortar y orga-

nizar sus propias piezas para poder multiplicarse. Si lográramos desactivar esa “tijera”, el virus no podría replicarse. Por eso, una estrategia muy prometedora es diseñar y fabricar nuevas moléculas que funcionen como obstáculos, capaces de impedir que esta “tijera” haga su trabajo.

Objetivos de la investigación

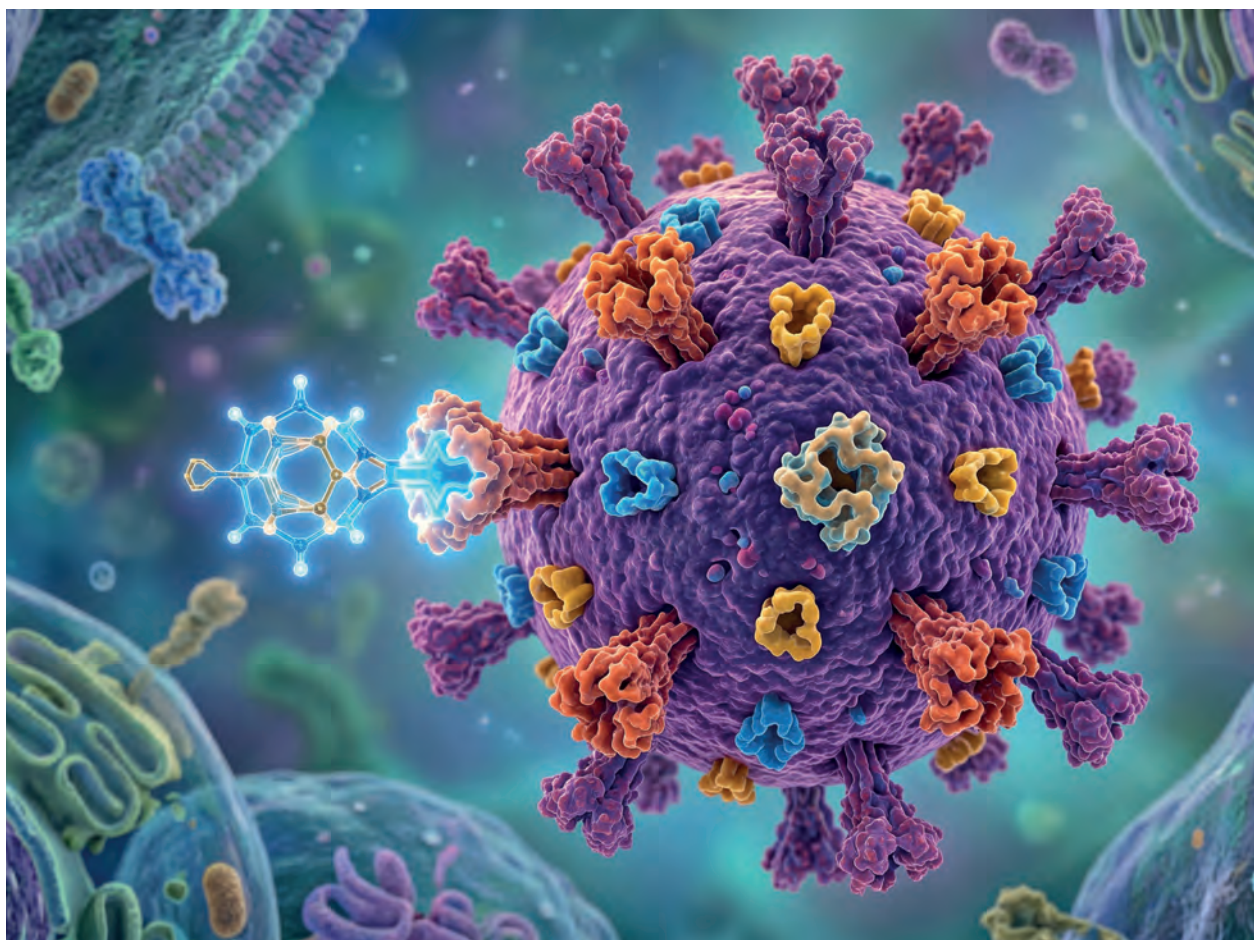
En nuestro trabajo partimos de una idea sencilla pero poderosa: si logramos bloquear alguna de las “herramientas” que el virus necesita para multiplicarse, podríamos frenar su avance dentro del cuerpo humano. Para ello, diseñamos una serie de armas invisibles –“moléculas especiales”– que actúan como bloqueadores del virus. Aunque sus nombres químicos son complejos, podemos imaginarlas como pequeñas piezas construidas a medida para cumplir una función específica. Una forma útil de entenderlo

es pensar en una llave y una cerradura. El virus tiene partes con formas muy específicas, como cerraduras, y sólo ciertas moléculas pueden encajar en ellas. Si se logra diseñar y fabricar la “llave” correcta, se puede impedir que el virus utilice esa parte esencial y, con ello, evitar que continúe replicándose.

Pero ¿cómo se construyen estas “llaves”? Aquí es donde entra una de las ideas más interesantes de nuestro trabajo. En lugar de fabricar cada molécula paso a paso, se utiliza una estrategia que se parece mucho a armar algo con piezas de Lego o a seguir una receta de cocina (**Figura 1**). Se mezclan varios ingredientes sencillos agregándolos uno tras otro, y, en un mismo proceso, se ensamblan esos bloques para formar una estructura más compleja. Este tipo de procesos se conocen como **reacciones de multicomponentes**, los cuales permiten generar rápidamente muchas moléculas diferentes sin necesidad de procesos adicionales, largos o complicados. Es como

Reacciones de multicomponentes

Reacción química en la que tres o más sustancias simples se combinan en un solo proceso para formar una molécula más compleja. Puede compararse con armar una figura de Lego utilizando varias piezas al mismo tiempo, en lugar de construirla paso a paso.



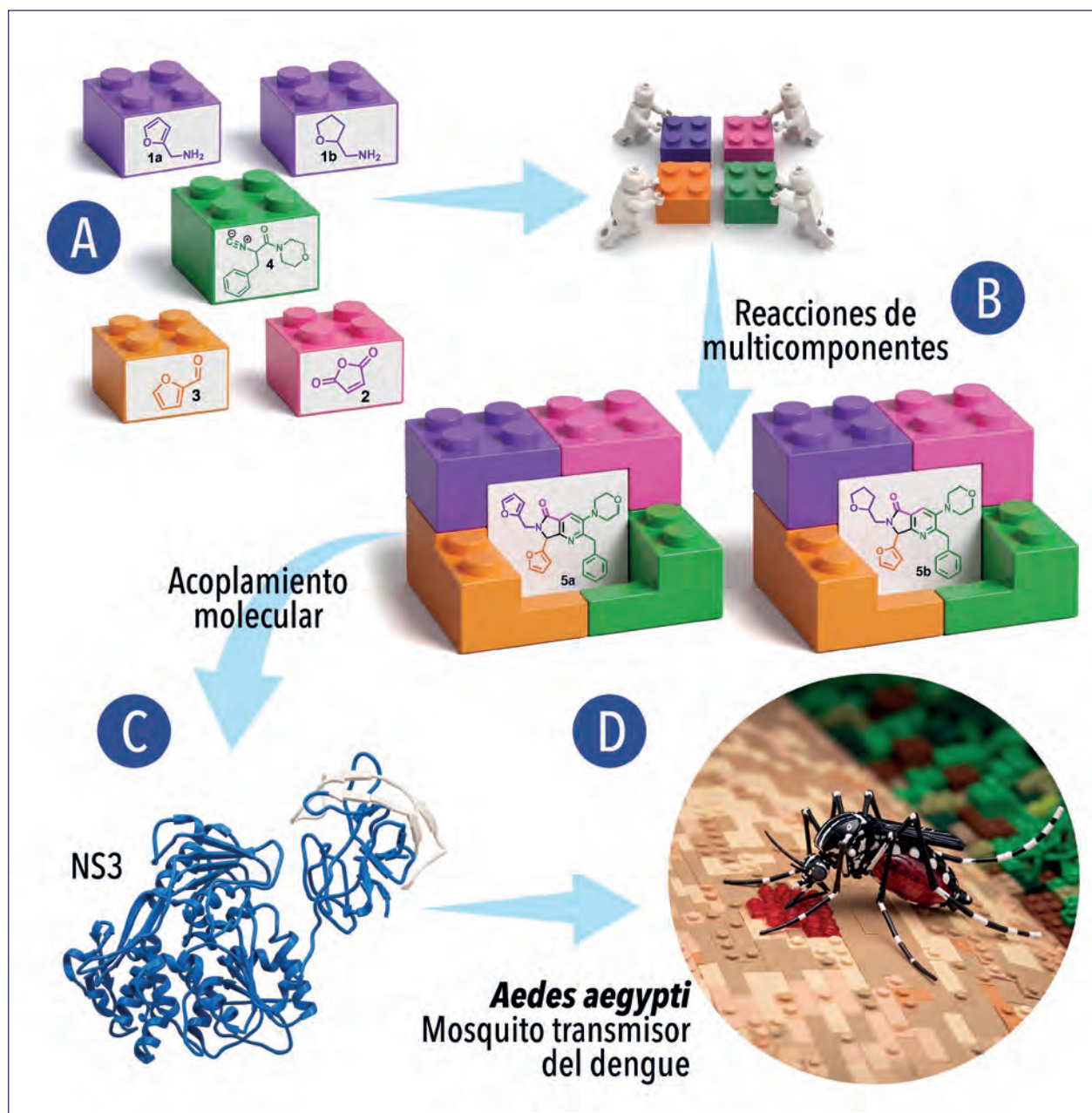


Figura 1. De la fabricación a la inhibición viral: diseño de armas invisibles (moléculas) contra el dengue mediante reacciones de multicomponentes. A) Bloques iniciales representados como piezas tipo Lego. B) Ensamblaje de estas piezas para formar las armas invisibles 5a y 5b. C) Proteína NS3 del virus del dengue, esencial para su replicación. D) Mosquito *Aedes aegypti*, transmisor del dengue. Créditos de imagen: diseño y elaboración propia de los autores y Joaquín González Vázquez, con apoyo de la inteligencia artificial.

tener una cocina donde, con los mismos ingredientes básicos, se pueden preparar muchos platillos distintos simplemente cambiando las combinaciones. Gracias a este enfoque, hemos podido explorar una gran variedad de “llaves” moleculares y analizar cuál de ellas se ajusta mejor a la “tijera” del virus. Esto es importante porque, en el mundo de la química, pe-

queños cambios en la estructura pueden tener grandes consecuencias en su funcionamiento. Al evaluar estas moléculas, se encontró que algunas funcionaban mejor que otras.

En particular, dos de ellas, a las que nombramos como 5a y 5b, destacaron por su capacidad para reducir la replicación del virus dentro de las células.

La molécula 5a fue la más efectiva, pues con ella se logró disminuir de manera notable la actividad del virus, mientras que 5b también mostró un efecto importante, aunque ligeramente menor. Además, estas moléculas no sólo redujeron la señal que utilizamos para medir la actividad viral, también disminuyeron de manera directa la cantidad de virus presente en un paciente. Esto es clave, porque indica que esas armas invisibles (5a y 5b) realmente están interfiriendo en el proceso de multiplicación del virus, y no sólo produciendo un efecto indirecto. Para entender por qué algunas moléculas funcionan mejor que otras, utilizamos herramientas computacionales que permiten simular lo que ocurre a nivel molecular. Estas simulaciones son como una especie de “lupa digital” para observar cómo las armas invisibles se acercan, se acomodan y se ajustan dentro de la “tijera” del virus.

Gracias a estos estudios apoyados en el uso de computadoras fue posible entender que las moléculas más efectivas son aquellas que logran trabajar mejor con la “tijera” del virus, formando interacciones más estables, como una llave que entra perfectamente en una cerradura y que se mantiene en su lugar. En cambio, otras moléculas, aunque muy parecidas, no logran trabajar igual de bien, y, por eso, no funcionan de la misma manera. Otro aspecto interesante es que estas moléculas tienen diferentes “zonas” con propiedades distintas. Algunas zonas se sienten más cómodas en ambientes similares al aceite (grasos), mientras que otras prefieren el agua. Esta combinación es importante porque el interior de las proteínas del virus también tiene regiones con estas características, lo que permite que las moléculas se adapten mejor a su entorno.

En conjunto, todos estos resultados demuestran algo muy importante: en el mundo molecular, los detalles lo son todo. Cambios muy pequeños en la forma de una molécula pueden marcar la diferencia entre que algo funcione o no, y entender estos detalles permite el diseño y fabricación de nuevas estrategias para combatir enfermedades como el dengue.

■ **Más allá del laboratorio: ¿por qué importa esto?**

■ Aunque estos compuestos aún están lejos de convertirse en medicamentos, representan un paso importan-

te en la lucha contra el dengue. Este tipo de investigaciones demuestran que es posible diseñar moléculas específicas contra virus, identificar puntos clave donde atacarlos y acelerar el desarrollo de nuevos tratamientos con ayuda de herramientas computacionales. El dengue no es sólo un problema científico, sino también social. En países como México, cada año se registran miles de casos, especialmente en regiones tropicales del sureste, donde las condiciones favorecen la reproducción del mosquito transmisor. En muchas de estas zonas, el acceso a servicios de salud es limitado, lo que puede agravar las consecuencias de la enfermedad. Por ello, desarrollar nuevos medicamentos no es sólo un desafío científico, sino una necesidad. A largo plazo, este tipo de investigaciones podrían contribuir a reducir la presión sobre los sistemas de salud, mejorar la respuesta ante nuevos brotes, y ofrecer nuevas opciones para proteger a las poblaciones más vulnerables. En este contexto, la química no sólo se utiliza para diseñar y fabricar nuevas moléculas, sino que también abre la puerta a soluciones que pueden mejorar la salud y la calidad de vida de muchas personas.

■ **Conclusión: diseñar el futuro, molécula a molécula**

■ La lucha contra el dengue requiere nuevas estrategias y la química ofrece una de las más prometedoras: diseñar moléculas capaces de bloquear las “herramientas” que el virus necesita para multiplicarse. Mediante el uso de reacciones de multicomponentes, similares a un ensamblaje tipo Lego, es posible construir de forma rápida esas armas invisibles con potencial actividad antiviral. Aunque aún falta camino para que estas moléculas se conviertan en medicamentos, este trabajo muestra que es posible avanzar hacia nuevas soluciones, combinando experimentos y herramientas computacionales.

En países como México, donde el dengue es un problema recurrente, este tipo de investigaciones resulta especialmente relevante. En última instancia, cada molécula diseñada y fabricada representa un paso más hacia el desarrollo de estrategias más efectivas para controlar esta enfermedad. Todas las investigaciones presentadas en el artículo se realizan

en el Laboratorio de Química Orgánica, Óptica y Fármacoquímica dentro de la Universidad Autónoma Metropolitana-Unidad Iztapalapa a cargo de los profesores Yoarhy A. Amador-Sánchez, Alejandro Islas-Jácome y Eduardo González-Zamora.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los participantes del manuscrito “In Vitro and In Silico Studies of Bis-furyl-pyrrolo[3,4-*b*]pyridin-5-ones on Dengue Virus”, publicado en el *Journal of the Mexican Chemical Society* (2024, 68(1):170-183), por su valiosa contribución en el desarrollo experimental y generación de resultados. Asimismo, se reconoce el apoyo institucional de la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, por proporcionar las facilidades para la realización de esta investigación. Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por el apoyo al proyecto de ciencia básica CBF-2025-I-3043.

Yoarhy A. Amador-Sánchez

Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa.
yoarhy@xanum.uam.mx

Alejandro Islas-Jácome

Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa.
aislas@izt.uam.mx

Eduardo González-Zamora

Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa.
egz@xanum.uam.mx

Lecturas recomendadas

- Amador-Sánchez, Y. A., R. E. Blanco-Carapia, J. C. Flores-Reyes *et al.* (2025), “Química de multi-componentes: Iluminando el futuro con materiales fluorescentes”, *Materiales Avanzados*, 5(8):70-76. Disponible en: <https://doi.org/10.22201/iim.rma.2025.7.155>.
- Amautas (s. f.), “La síntesis orgánica y su papel en la industria química”, *Amautas* [en línea]. Disponible en: <https://amautas.com/la-sintesis-organica-y-su-papel-en-la-industria-quimica/>, consultado el 2 de junio de 2026.
- Narro-Robles, J. y H. Gómez-Dantés (s. f.), “El dengue en México: un problema prioritario de salud pública”, *Revista de Salud Pública de México* [en línea]. Disponible en: <https://www.saludpublica.mx/index.php/spm/article/view/4560/5012>, consultado el 2 de junio de 2026.
- National Geographic Latinoamérica (2024), *¿Qué es el dengue, cómo se contagia y cuánto duran los síntomas?* <https://www.nationalgeographicla.com/ciencia/2024/12/que-es-el-dengue-como-se-contagia-y-cuanto-duran-los-sintomas>.
- Novartis (2021), “5 pasos para desarrollar un medicamento”, *Novartis* [en línea]. Disponible en: <https://www.novartis.com/es-es/stories/5-pasos-para-desarrollar-un-medicamento>, consultado el 2 de junio de 2026.
- Wikipedia (2026), “Descubrimiento de fármacos”. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Descubrimiento_de_f%C3%A1rmacos, consultado el 2 de junio de 2026.



Roberto Bernal Jaquez



Ecuaciones contra mosquitos: las matemáticas también son útiles para su control

Resumen

En muchos lugares de México, unas llantas abandonadas pueden convertirse en un reservorio para el dengue. Aquí te contamos cómo la lluvia, los mosquitos y la movilidad se conectan. Las matemáticas, las redes complejas y las redes neuronales ayudan a anticipar riesgos y a tomar mejores decisiones de salud pública. Así, una ecuación puede mirar donde el ojo no alcanza para salvar vidas.

Abstract

In many places in Mexico, abandoned tires can become a reservoir for dengue. In this article we describe how rain, mosquitoes, and mobility connect. Mathematics, complex networks, and neural networks help anticipate risks and make better public health decisions. Thus, an equation can give clarity where the eye cannot reach to save lives.

Introducción: los detectives de lo invisible

Imagina que eres un detective en una ciudad donde se está cometiendo un “crimen” biológico a gran escala. El culpable es minúsculo: el mosquito *Aedes aegypti*. No deja huellas dactilares, no tiene un patrón de ataque obvio a simple vista y se aprovecha de algo que todos hacemos: movernos y vivir.

Para combatirlo, la medicina y la biología son fundamentales; pero hay un aliado silencioso que ofrece una perspectiva distinta: las matemáticas. Mientras el médico cura al paciente, el matemático intenta entender el sistema. Para nosotros, la propagación del dengue no es una serie de eventos fortuitos, sino un conjunto de engranajes que se mueven siguiendo reglas lógicas. Si logramos traducir esas reglas al lenguaje de la matemática, podremos predecir el siguiente movimiento del enemigo. Este artículo es una invitación a mirar a través de los ojos de una persona experta en matemática para entender cómo desentrañamos la propagación de una enfermedad.



■ Objetivos

■ El objetivo principal es construir una herramienta que ayude a anticipar escenarios de riesgo de dengue. Para ello, se busca identificar qué factores pesan más en un brote: temperatura, lluvia, acumulación de agua, presencia de mosquitos, densidad de población y movimiento de personas entre colonias o ciudades.

El segundo objetivo es construir un simulador de futuro: un modelo capaz de predecir brotes –colonia por colonia– con suficiente anticipación para actuar.

El tercer objetivo es apoyar decisiones de salud pública. Si los recursos son limitados, conviene dirigirlos a los puntos donde pueden tener mayor efecto. Un **modelo matemático** bien alimentado con datos ayuda a decidir dónde reforzar campañas, cuándo fumigar y qué zonas requieren atención especial.

■ Metodología: ¿cómo se construye un motor de contagio?

■ Para un matemático, el contagio del dengue es un proceso de transferencia. No es que las personas se pasen el virus unas a otras como ocurre con la gripe; existe un intermediario con alas. Ahí es donde nuestras ecuaciones empiezan a dibujar el “motor” del problema.

Para estudiarlo, las matemáticas simplifican la realidad sin perder lo esencial. Una forma de hacerlo es dividir a la población en **compartimentos**: personas que pueden enfermarse, personas infectadas y personas recuperadas. Algo similar se hace con los mosquitos: algunos no portan el virus y otros sí pueden transmitirlo.

Cuando un mosquito pica a alguien infectado, el virus debe desarrollarse dentro del insecto antes de poder transmitirse. Si el mosquito sobrevive el tiempo

Compartimentos

Grupos de personas con el mismo estado frente a la enfermedad (sanas, infectadas, recuperadas) que los modelos usan para contar cuántos hay en cada categoría y a qué velocidad pasan de una a otra.

Modelo matemático

Representación simplificada de un problema real mediante números, relaciones y reglas que permiten entenderlo y hacer predicciones.

Criadero

Lugar donde el mosquito puede poner sus huevecillos y reproducirse, generalmente en agua estancada o acumulada.

Red neuronal

Herramienta de inteligencia artificial que aprende patrones a partir de grandes cantidades de datos, similar a como aprende el cerebro humano.

Simulación estocástica

Ensayo por computadora de distintos escenarios posibles que incluye el azar, reconociendo que en la vida real los eventos no siempre ocurren exactamente igual.

Red compleja

Forma de representar muchos elementos conectados, como colonias, rutas, personas o lugares de una ciudad, para estudiar cómo fluye información o enfermedad entre ellos.

suficiente, puede contagiar a alguien más. Nuestras ecuaciones “cuentan” ese tiempo con precisión: si el mosquito muere antes de que el virus alcance sus glándulas salivales, la cadena se rompe.

El clima también entra en el modelo. La lluvia genera **criaderos**, mientras que la temperatura modifica la vida del mosquito y la velocidad con la que el virus se desarrolla. Para capturar esta influencia, integramos modelos de inteligencia artificial: **redes neuronales** que ayudan a encontrar patrones en grandes cantidades de datos. Aprenden de los datos de lluvia, temperatura, humedad y reportes de casos para detectar señales tempranas. No “adivinan” el futuro, pero reconocen condiciones parecidas a las que antes acompañaron un aumento de casos.

Las redes neuronales con memoria larga a corto plazo (en inglés, *long short-term memory* o LSTM) aprenden los patrones históricos del clima y proyectan su comportamiento futuro, alimentando las ecuaciones del modelo epidemiológico.

Las personas, además, no se quedan quietas. Viajamos al trabajo, a la escuela o a visitar familiares. Si una persona infectada viaja de la zona A a la zona B, donde no hay casos, pero sí hay mosquitos, puede iniciar un nuevo brote. Para capturar esta dinámica usamos **redes complejas**: mapas matemáticos donde cada colonia es un punto y cada ruta —medios masivos de transporte, carretera, camino vecinal— es una conexión. El modelo calcula el flujo de personas y nos advierte dónde el virus podría viajar con ellas, identificando los nodos más críticos: mercados, terminales de transporte, espacios donde la densidad de mosquitos transmisores (también llamados “vectores”) y el flujo humano crean el caldo de cultivo perfecto para un brote.

Innovación: redes, datos e inteligencia artificial desde la UAM

En la UAM se realiza investigación en modelos matemáticos aplicados a salud pública, incluyendo el uso de redes complejas y redes neuronales. Las redes complejas permiten representar colonias, rutas, escuelas, mercados o zonas de trabajo como puntos



conectados y estudiar cómo se propaga el dengue de un lugar a otro.

Para probar qué estrategias funcionan mejor, recurrimos a la **simulación estocástica**; esto es, en nuestras computadoras creamos miles de “ciudades virtuales”, copias digitales de la realidad. En un universo virtual no hacemos nada; en otro fumigamos el 20% de las casas; en otro simulamos una ola de calor extrema. Al comparar estos universos paralelos, las matemáticas nos dicen cuál estrategia tiene mayor probabilidad de éxito.

El equipo humano de Modelación Matemática, Redes Complejas e Inteligencia Artificial para Salud Pública de la UAM busca construir herramientas que traduzcan datos en alertas útiles, comprensibles y oportunas.

Incidencia social: de los números a la calle

El impacto de este trabajo es directo y tangible. Las matemáticas transforman la incertidumbre en estrategia. En lugar de lanzar insecticida por toda la ciudad —lo cual es costoso, contamina y genera resistencia en los mosquitos—, el modelo produce un “mapa de calor”. Las autoridades envían sus brigadas sólo a

las manzanas “calientes” donde el motor de contagio está a punto de encenderse, lo cual hace posible una fumigación inteligente, no fumigación masiva.

La utilidad de estos modelos no está sólo en la computadora, está en la calle. Si un modelo señala que una zona tiene alto riesgo, las autoridades pueden organizar campañas de limpieza, fumigación focalizada o comunicación preventiva antes de que aumenten los casos.

Los modelos también ayudan a las familias, mostrando qué acciones pequeñas pueden tener consecuencias grandes: retirar una llanta, tapar un tinaco, lavar un recipiente o voltear una cubeta no son detalles menores, son formas de cortar una cadena de transmisión.

Al predecir con semanas de antelación, los hospitales pueden prepararse, asegurar insumos y camas, y lanzar campañas de comunicación dirigidas. Las matemáticas dan confianza a quienes toman decisiones para actuar con firmeza.

■ **Conclusión: tu papel en la ecuación**

■ El combate al dengue no empieza únicamente en los hospitales. Muchas veces empieza en lugares cotidianos: un patio, una azotea, una llanta olvidada después de la lluvia. Las matemáticas permiten unir esas piezas y ver el patrón completo.

Una lluvia en un barrio, un viaje en autobús y la temperatura de una tarde se unen para formar un patrón que las ecuaciones pueden leer. Entender que las matemáticas son herramientas para salvar vidas cambia nuestra perspectiva de la ciencia: no son fórmulas en un pizarrón, son el lenguaje con el que podemos proteger a nuestra comunidad y ganar la batalla contra el mosquito.

Cuando ciencia, comunidad y salud pública trabajan juntas, una ecuación deja de ser algo lejano: se convierte en una herramienta para cuidar la vida.

Roberto Bernal Jaquez

Universidad Autónoma Metropolitana-Cuajimalpa.

rbernal@cua.uam.mx

Lecturas recomendadas

Bonfil Olivera, M. (2001), “Modelos científicos”, *¿Cómo ves?*, 37, Divulgación de la Ciencia, UNAM [en línea]. Disponible en: <https://www.comoves.unam.mx/numeros/ojodemosca/37>, consultado el 3 de junio de 2026.

Castillo, N. (2013), “Redes sociales, nuevas herramientas para estimar el riesgo de epidemias”, *Ciencia UNAM* [en línea]. Disponible en: https://ciencia.unam.mx/leer/295/Redes_sociales_nuevas_herramientas_para_estimar_el_riesgo_de_epidemias, consultado el 3 de junio de 2026.

Olguín Lacunza, M. A. (2020), “Los modelos matemáticos son herramientas que pueden servir para diseñar políticas públicas y tomar decisiones que a veces son difíciles”, Instituto de Matemáticas, UNAM [en línea]. Disponible en: <https://www.matem.unam.mx/acerca-de/noticias/los-modelos-matematicos-son-herramientas-que-pueden-servir-para-diseñar-políticas-públicas-y-tomar-decisiones-que-a-veces-son-difíciles>, consultado el 3 de junio de 2026.

OMS (2024), “Dengue y dengue grave”, Organización Mundial de la Salud [en línea]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/dengue-and-severe-dengue>, consultado el 3 de junio de 2026.

Secretaría de Salud (2016), “Dengue y las medidas preventivas”, Gobierno de México [en línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/salud/articulos/dengue-y-las-medidas-preventivas>, consultado el 3 de junio de 2026.

UNAM-DGCS (2020), “Los patógenos se mueven con la gente por las rutas de transporte, las matemáticas son capaces de explicar cómo se dispersan los virus”, Instituto de Matemáticas, UNAM [en línea]. Disponible en: <https://www.matem.unam.mx/acerca-de/noticias/los-patogenos-se-mueven-con-la-gente-por-las-rutas-de-transporte-las-matematicas-son-capaces-de-explicar-como-se-dispersan-los-virus>, consultado el 3 de junio de 2026.

World Mosquito Program (s. f.), “Dengue”, World Mosquito Program [en línea]. Disponible en: <https://www.worldmosquitoprogram.org/es/dengue>, consultado el 3 de junio de 2026.



Rurik List, Alejandra Espinosa y Christian Javier Prado Hernández



La reintroducción del bisonte y la restauración de los pastizales en México

Resumen

El bisonte americano, especie nativa extinguida en México en el siglo XIX, ha sido reintroducido en el norte del país desde 2009. Actualmente existen cuatro manadas de conservación, con el propósito de restaurar las funciones ecológicas que estos mamíferos tuvieron en el pasado y que se espera contribuyan a la restauración de los pastizales, así como a recuperar la relación biocultural que tuvieron con pueblos originarios.

Abstract

The American bison, a native species that went extinct in Mexico in the 19th century, has been reintroduced to the north of the country since 2009. Currently, there are four conservation herds, with the purpose of recovering the ecological functions that these mammals had in the past and which are expected to contribute to the restoration of the grasslands, as well as to the rescue of the biocultural relationship they had with indigenous peoples.

Introducción

El bisonte americano (*Bison bison*) es parte de la fauna original de los estados del norte de México; sin embargo, se extinguió de nuestro país en la segunda mitad del siglo XIX. A lo largo del tiempo se fueron importando bisontes de los Estados Unidos a los zoológicos y ranchos privados de nuestro país, como animales de ornato mantenidos en áreas cercadas reducidas. Recientemente, México se unió a un esfuerzo para la recuperación continental del bisonte. Con la colaboración entre la academia, el gobierno y organizaciones civiles, en el 2009 se trajeron 23 bisontes del Parque Nacional de Wind Cave en Dakota del Sur, Estados Unidos, para formar una manada de conservación en la Reserva de la Biosfera Janos, Chihuahua, con la idea de regresar esta especie a los pastizales donde habitaba históricamente.



Un tercio de la superficie terrestre está ocupada por pastizales nativos, ecosistemas donde los pastos y hierbas son la vegetación dominante y puede haber algunos árboles y arbustos aislados o estar completamente abiertos. Estos ecosistemas suelen estar sobre suelos profundos, fértiles, por lo que en la época de lluvia hay un gran crecimiento de **biomasa**; prácticamente todo el suelo está cubierto de alimento para los herbívoros. Gracias a esto, las mayores concentraciones y migraciones de mamíferos terrestres grandes se han dado en los pastizales; la más notable fue la del bison americano, pero fueron cazados casi hasta la extinción y quedaron menos de 1 000 individuos a finales del siglo XIX.

Los pastizales son de los ecosistemas más amenazados y menos protegidos globalmente. Al ser reemplazados los grandes herbívoros por ganado, muchos sitios con pastizal se están degradando por el sobrepastoreo del ganado vacuno. Debido a la fertilidad

de sus suelos, los pastizales se están perdiendo a una velocidad alarmante, al ser convertidos en tierras agrícolas o debido a la expansión de las zonas urbanas y la **fragmentación** del paisaje por carreteras y cercos ganaderos que limitan el movimiento de la fauna silvestre. En conjunto, estos problemas han causado la reducción de la biodiversidad y han acercado a muchas especies a la extinción.

Como consecuencia del incremento en la temperatura y en la duración de los periodos de sequía, se seca mucho la vegetación, lo que a su vez aumenta la frecuencia e intensidad de incendios devastadores; los bosques en todo el mundo se están quemando, liberando a la atmósfera el carbono almacenado en la madera. En cambio, los pastizales evolucionaron con la presencia del fuego como un factor de la dinámica ecológica que ayuda a mantenerlos como ecosistemas abiertos. En éstos, la mayor parte de la biomasa es subterránea, se encuentra almacenada en

Fragmentación

Proceso por el cual los ecosistemas se dividen en fragmentos más pequeños que soportan menos especies.

Biomasa

Materia orgánica (plantas, animales, microorganismos y sus restos) compuesta por carbono capturado del aire. En los pastizales, la biomasa subterránea retiene ese carbono, incluso cuando ocurren incendios.

Biocultural
Interdependencia entre la biodiversidad y las culturas, resultado de la interacción a lo largo del tiempo.

el complejo sistema de raíces, de forma que cuando un incendio arrasa un pastizal, solamente se quema la parte de la vegetación que está sobre el suelo, que se renueva en la primera temporada de lluvias, mientras la mayor parte del carbono queda protegido en la biomasa del suelo.

El bisonte es el mayor mamífero terrestre del continente, y después de la llegada de los europeos a América, se estima que habitaban alrededor de 30 millones de bisontes. La combinación de su tamaño, capacidad de desplazamiento y número de individuos ha influido en los pastizales de forma extraordinaria: aumentaban la biodiversidad, cambiaban los patrones de incendios naturales y daban sustento e identidad cultural a los habitantes originales de estas regiones. Es por esto que nuestro grupo decidió trabajar con el bisonte en México.

■ **Objetivos del trabajo**

■ Un objetivo del Área Académica en Biología de la Conservación de la UAM Lerma es impulsar la recuperación del bisonte como una estrategia para contribuir a la restauración de los pastizales del norte de México. Esto requiere de la **reintroducción** de bisontes dentro del área que ocuparon históricamente en el país y de la investigación sobre los efectos que las actividades de los bisontes generan en los ecosistemas a lo largo del tiempo. También nos interesa reconectar a la gente con el bisonte, particularmente a los grupos originarios que interactuaron con ellos a lo largo de cientos o miles de años.

■ **Métodos de investigación**

■ Realizamos una revisión de los estudios que han evaluado el efecto de los bisontes en los ecosistemas en los que habitan, para determinar los efectos que potencialmente se podrán observar en los ecosistemas de México tras su reintroducción. Promovemos y participamos de los esfuerzos de reintroducción de bisontes en distintos sitios, para dar seguimiento a los cambios que sucedan tras el regreso de manadas de bisontes. También revisamos la literatura y entrevistamos gente de la nación N'dee/N'nee/Ndé,

llamados “apaches” por los colonizadores, para documentar la importancia cultural que tuvo el bisonte para ellos. Facilitamos el contacto entre los sitios de reintroducción y los N'dee/N'nee/Ndé para contribuir a la recuperación de la relación **biocultural** con esta especie.

■ **Innovación**

■ Como resultado de un importante esfuerzo de colaboración y derivado de los 23 bisontes originales, en México existen ya cuatro manadas de conservación, las primeras en el país, que mantienen alrededor de 438 individuos en Janos, Chihuahua; 140 en Maderas del Carmen, Coahuila, y en el último año se formaron dos manadas más: una en Cuatrociénegas, Coahuila, con 44 bisontes, y otra en Cuenca Los Ojos, en Agua Prieta, Sonora, con 29 bisontes, que en conjunto están utilizando alrededor de 50 000 hectáreas de pastizales y matorrales. Esto representa un logro notable para la conservación de la biodiversidad en México y un gran avance hacia la recuperación biocultural del bisonte.

El cambio climático requiere acciones urgentes para reducir los gases en la atmósfera que lo causan, principalmente el carbono. La conservación de pastizales que aún se encuentran en buen estado y la restauración de los que se han degradado ayuda a almacenar el carbono en el sistema de raíces de los pastizales. Al reintroducir bisontes, regresan funciones (**Figura 1**) que se perdieron de estos ecosistemas. Ayudan a dispersar las semillas que se pegan en el pelo de estos mamíferos. Su excremento, orina y cadáveres fertilizan el suelo, ayudando al crecimiento de los pastos. Se alimentan de nopales, que han proliferado por la ausencia de herbívoros nativos que los consumían, con lo que abren el pastizal. De forma similar, se frotan contra los arbustos y árboles, derribándolos, y con ello mantienen el pastizal como un ecosistema abierto. Sus excrementos son aprovechados por los escarabajos peloteros, que los entierran y con ello almacenan en el suelo el carbono contenido en estos desechos orgánicos. Al revolcarse para darse baños de tierra los bisontes crean depresiones donde

Reintroducción
Proceso de regresar a los individuos de una especie a un lugar del cual desaparecieron.



Figura 1. Las actividades de los bisontes, como: *a)* revolcarse; *b)* rascarse contra árboles y arbustos; *c)* pastar; *d)* alimentarse de forma selectiva; *e)* beber, y *f)* pisotear la vegetación, modifican a las especies que se encuentran en esos lugares y el funcionamiento de los ecosistemas. Además, los bisontes contribuyen a: *g)* dispersar semillas; *h)*, *i)* y *j)* reciclar los nutrientes; *k)* crear hábitat, así como a *l)* y *m)* proveer recursos a otras especies. Ilustración basada en fotos de Rurik List, con diseño de Karla Pelz Serrano y diseño gráfico de Joaquín González Vázquez y asistencia de inteligencia artificial.

durante las lluvias se acumula el agua, favoreciendo la presencia de animales que requieren de los charcos. Por esto, la reintroducción del bisonte en México es una estrategia innovadora para restaurar los pastizales; su futuro es prometedor y se está despertando un entusiasmo por este carismático mamífero. Para que persista, se requiere mantener los pastizales existentes

y regresar a su condición de pastizal a las grandes extensiones que han sido invadidas por matorrales. De hecho, el mismo bisonte contribuye a esta reconversión mediante sus actividades. Necesitamos evaluar periódicamente los cambios en los ecosistemas para conocer qué está pasando e intervenir oportunamente si se requieren acciones de manejo.

■ Incidencia social

■ Ante la crisis que enfrenta la biodiversidad, la Asamblea General de las Naciones Unidas declaró el periodo del 2021 al 2030 la Década de la Restauración Ecológica y 2026 como el Año Internacional de los Pastizales y los Pastores, por lo que el trabajo de reintroducción de bisontes encaja perfectamente en ambas prioridades reconocidas globalmente, y confiamos en que contribuirá al almacenamiento del carbono y a la restauración de los pastizales del norte de México.

Como los bisontes, los N'dee/N'nee/Ndé fueron perseguidos por los gobiernos de México y Estados Unidos, y para sobrevivir se vieron forzados a hacerse pasar por mexicanos, escondiendo su lengua y su cultura. Recientemente, han comenzado a recuperar su identidad, sus raíces y están reaprendiendo su idioma y costumbres con ayuda de las tribus —que es como se identifican ellos en Estados Unidos—, que al ser confinadas a reservas pudieron mantener su lengua y tradiciones. El movimiento de los bisontes para formar las dos manadas más recientes permitió que representantes de la nación N'dee/N'nee/Ndé participaran con ceremonias para despedir a los bisontes antes de su viaje y darles la bienvenida a su llegada a los nuevos sitios, lo que no había sucedido en México en 150 años.

Uno de los retos que enfrenta la reintroducción del bison, como en el caso de otras especies, es la aceptación pública. Mediante divulgación a través de conferencias y medios de comunicación, estamos contribuyendo a que el bison sea reconocido como parte de la fauna nativa de México y despertando el interés en apoyar los esfuerzos para su recuperación, lo que ha facilitado que se abran las puertas para crear nuevas manadas.

Rurik List

Universidad Autónoma Metropolitana, Departamento de Ciencias Ambientales, Área Académica en Biología de la Conservación.
r.list@correo.ler.uam.mx

Alejandra Espinosa

Universidad Autónoma Metropolitana, Licenciatura en Biología Ambiental.
ale.espinslv@gmail.com

Christian Javier Prado Hernández

Universidad Autónoma Metropolitana, Licenciatura en Biología Ambiental.
christianph21@gmail.com

Lecturas recomendadas

- List, R. (2004), "Pastizales: una delgada capa verde entre el cielo y la tierra", *Especies: Revista sobre Conservación y Biodiversidad*, 18-23. Disponible en: <https://naturalia.org.mx/publicaciones/Pastizales_entre_cielo_tierra.pdf>, consultado el 3 de junio de 2026.
- List, R. (2006), "Bisonte americano: el migrante que se negó a extinguirse", *Especies: Revista sobre Conservación y Biodiversidad*, 8-14. Disponible en: <<https://naturalia.org.mx/publicaciones/BisonteAmericano.pdf>>, consultado el 3 de junio de 2026.
- Semarnat-Conanp (2019), *Programa de Acción para la Conservación de la Especie: Bisonte (Bison bison)*, Se-

cretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas [en línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/500223/PACE_Bisonte2.pdf>, consultado el 3 de junio de 2026.

Soto Chica, J. (2021), "1935. Cacería humana de apaches en el México revolucionario", *Desperta Ferro* [en línea]. Disponible en: <<https://www.despertaferro-ediciones.com/2021/mexico-1935-caceria-humana-apaches-broncos/>>, consultado el 3 de junio de 2026.

Alonso Fernández-Guasti



Quiénes son, por María Julia Hidalgo López

Quiénes son?, pregunta María Julia y la respuesta es: personas del mundo académico (geólogos, sociólogos, matemáticos, físicos, médicos, lingüistas, historiadores, etc.) que diario contribuyen al crecimiento del saber. El libro, publicado por la Universidad Autónoma de Sinaloa, reúne 21 entrevistas a investigadores que exponen un aspecto particular de la ciencia que se desarrolla en México. Los entrevistados son expertos que llevan a cabo su investigación en una oficina, en el campo, en una biblioteca o en un laboratorio y que además participan en la divulgación del conocimiento. Este pequeño libro ofrece temas complejos en palabras simples. Naturalmente éste es uno de los mayores logros de María Julia; sabe qué preguntar y cómo redactar la respuesta para hacerla accesible a todo el público.

María Julia se cuestionó desde muy joven: ¿Hay científicos en México? ¿Qué hacen? ¿Quiénes son? En este libro ella escribe sobre varios temas escogidos de acuerdo con sus intereses. Estos tópicos son sólo una pequeña muestra de lo mucho que se hace en la academia mexicana. *Quiénes son* es un libro de divulgación de la ciencia en el que se plantean diversas preguntas: ¿qué es la ansiedad?, ¿se vende la basura?, ¿cómo influyen las religiones en la política?, ¿qué mantiene los ritmos de la vida?, ¿qué hace un matemático? Las respuestas a esas —y a otras interrogantes igualmente interesantes— conforman el corazón de este escrito. El libro confirma la maestría de María Julia para hacer buena divulgación científica, ya que la información aquí incluida aclara conceptos



desde una visión acreditada y objeta mitos y falsas creencias. Como menciona la autora, desafortunadamente las líneas que separan la ciencia de la pseudociencia son muy difíciles de apreciar para personas inexpertas. Sin embargo –no todo es ciencia en este libro– María Julia también hace preguntas personales cuyas respuestas resaltan el aspecto humano de los que hacemos investigación en México.

En la última sección, la autora menciona que un investigador debe poseer conciencia crítica y una curiosidad desbordada. El interés por comprender tiene muchas direcciones que se definen a lo largo de cada trayectoria: hacia arriba, los astros, la luz; abajo, las moléculas, los átomos; afuera, la diversidad de especies, los fenómenos físicos, las relaciones humanas;

adentro, la complejidad de los seres vivos; atrás, la historia, la prehistoria; adelante, el futuro del planeta, de los seres humanos... *Quiénes son* es un libro informativo, ameno y que otorga una visión humana de los investigadores.

María Julia estudió comunicación y administración de organizaciones. Está interesada en temas científicos y en literatura. Ha escrito otros libros de divulgación científica. También cuenta con textos ficcionales, como su publicación quincenal *Las alas de Titika* en el periódico *Noroeste* o *La mujer que quiso hacer todo al revés*. Además, durante muchos años tuvimos el gusto de que María Julia colaborara con esta revista.

Reporte especial del Barómetro Edelman sobre confianza y salud 2026

2026 Trust Barometer Special Report: Trust and Health

Edelman es una firma global fundada en 1952, que emite un reporte sobre la confianza social acerca de distintos temas desde hace más de 25 años. El trabajo de campo se llevó a cabo entre febrero y marzo del 2026, en 16 países a través de más de 16 000 encuestas realizadas con al menos 1 000 entrevistados por país. Los países incluidos son: Alemania, Australia, Brasil, Canadá, China, Corea del Sur, Emiratos Árabes Unidos, Estados Unidos de

América, Francia, India, Indonesia, Japón, México, Reino Unido, Singapur y Sudáfrica.

En el contexto actual, caracterizado por una sobreabundancia informativa, el reporte Edelman 2026 plantea una tesis preocupante: la confianza pública en los sistemas de salud se ha fragmentado, desplazándose desde las instituciones tradicionales (hospitales, secretarías de salud) hacia entornos más cercanos y personales (familia) y las redes sociales.



Las decisiones personales de salud ya no dependen únicamente de la evidencia científica, las instituciones médicas o las autoridades de gobierno, sino de un conjunto de factores, donde compiten los profesionales de la salud, los científicos, los familiares, las redes sociales, los creadores de contenido y las plataformas de inteligencia artificial (IA).

Uno de los aportes más relevantes del informe es que la salud se ha convertido en un terreno cada vez más atravesado por la polarización social; la población en diversos países ha disminuido su confianza en los sistemas de salud y se ha debilitado la credibilidad gubernamental. Dos de cada tres personas consideran que su país está muy dividido en temas de salud y atención sanitaria. Estados Unidos aparece como el caso más polarizado, mientras que México se localiza en tercer lugar. La población percibe que la salud se ha vuelto un campo de disputa política.

La experiencia de la pandemia del COVID-19 debilitó la credibilidad del periodismo en materia sanitaria. Por otro lado, alrededor de un tercio de los encuestados afirma usar IA para tomar decisiones acerca de su salud, de su nutrición y de su acondicionamiento físico; es decir, la IA se ha convertido en herramienta práctica de orientación cotidiana.

Pese a esa caída de la confianza en muchos actores del ecosistema de salud, el médico personal si-

gue siendo la figura más confiable, seguido por los científicos, los amigos y los familiares. El documento rompe un estereotipo común: las personas con opiniones más polarizadas no necesariamente son las más aisladas, desinformadas o poco educadas, sino que están distribuidas entre distintos grupos etarios, posiciones políticas y niveles educativos. Esta observación es central, porque desplaza el problema desde una visión paternalista —“la gente cree eso porque no sabe”— hacia una visión más compleja: las personas pueden estar inmersas en información y aun así llegar a conclusiones muy polarizadas.

En resumen, el reporte de 2026 describe un mundo sanitario más complejo. La confianza ya no se deposita de manera automática en las vacunas, instituciones o autoridades. En consecuencia, para reconstruir la confianza pública, es necesario combinar el rigor científico con una cercanía humana, mayor justicia social y una traducción accesible, que considere especialmente la actual polarización de la ciudadanía.

Para consultar este reporte:

⟨https://www.edelman.com/sites/g/files/aatuss191/files/2026-04/2026%20Edelman%20Trust%20Barometer%20Special%20Report%20Trust%20and%20Health_Final.pdf⟩.

José Eduardo González Reyes

Desde las redes

Artemis II: un ensayo exitoso hacia la superficie lunar

Después de más de cinco décadas desde el inicio del programa Apolo, la humanidad ha vuelto a asomarse a la vecindad de nuestro satélite natural. La misión Artemis II, que despegó con éxito el pasado 1 de abril, completó un histórico viaje que sienta las bases tecnológicas y logísticas para el regreso del ser humano a la Luna.

A bordo de la cápsula Orion, impulsada por el cohete de carga pesada Space Launch System (SLS), los astronautas Reid Wiseman, Victor Glover, Christina Koch y Jeremy Hansen protagonizaron este esperado vuelo. El objetivo principal no era alunizar, sino realizar una exhaustiva prueba de vuelo para validar los sistemas de soporte vital, comunicación y navegación de la nave en el entorno del espacio profundo con una tripulación real.

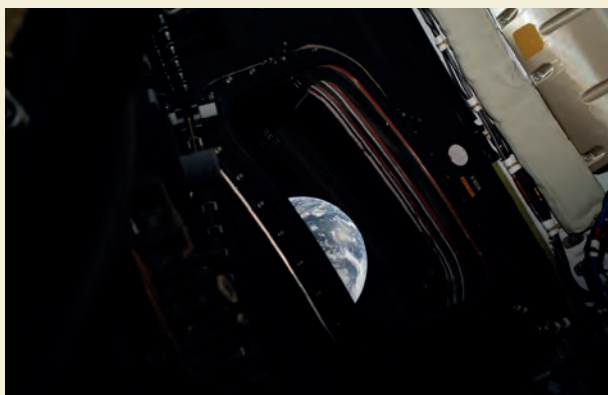
Como dato histórico y curioso, Artemis II rompió importantes barreras de representación en la exploración espacial. Es la primera vez que una misión lunar incluye a una mujer, Christina Koch, a

una persona afroamericana, Victor Glover, y a un astronauta no estadounidense: el canadiense Jeremy Hansen, quien se sumó a la tripulación gracias a acuerdos de cooperación internacional.

La bitácora de vuelo documentó el progreso paso a paso. Durante el tercer día, la tripulación ejecutó con precisión una maniobra de corrección de trayectoria, un encendido de motores vital para asegurar el rumbo exacto hacia el satélite. El momento más esperado ocurrió en el sexto día, cuando la cápsula alcanzó su punto máximo en un sobrevuelo lunar. Aprovechando una trayectoria de retorno libre, la gravedad de la Luna impulsó a la nave alrededor de su cara oculta para luego catapultarla de manera segura en su viaje de regreso a la Tierra.

Tras un amerizaje que demostró la eficacia de los escudos térmicos y los sistemas de recuperación, los astronautas finalmente regresaron a Houston el 11 de abril para reencontrarse con sus familias. El éxito en cada una de estas fases operativas confirmó que la nave Orion es capaz de albergar y proteger a los humanos en misiones prolongadas.

Toda la información recabada es el preámbulo indispensable para Artemis III, la misión que tiene el firme propósito de que una nueva generación de exploradores camine sobre la superficie lunar. Este vuelo nos recuerda que el objetivo a largo plazo no se detiene en la Luna, sino que nos prepara para el próximo gran salto: llegar a Marte.



Vista de la Tierra tomada por el astronauta de la NASA y comandante de la misión Artemis II, Reid Wiseman, desde una de las cuatro ventanas principales de la nave espacial Orion, tras completar la maniobra de inyección translunar, el 2 de abril de 2026. Crédito: NASA.

Más información

NASA (2026), NASA Missions [en línea]. Disponible en: <https://www.nasa.gov/blogs/missions/>.

Una herramienta para desenmascarar revistas científicas dudosas

Ante el creciente número de opciones, decidir dónde publicar los resultados de una investigación puede ser una tarea abrumadora. Resulta cada vez más difícil para la comunidad científica evaluar qué revistas son verdaderamente confiables. Para facilitar este proceso y evitar caer en manos de editoriales de baja calidad o depredadoras, ha surgido una nueva plataforma gratuita llamada Journal Trends.

Desarrollada por Achal Agrawal –científico de datos radicado en la India–, esta herramienta permite rastrear los patrones de publicación de revistas académicas. Tradicionalmente, requería horas de arduo análisis manual detectar un comportamiento sospechoso, como el aumento repentino en el número de artículos publicados provenientes de un solo país, lo que suele sugerir una revisión por pares deficiente.

Con Journal Trends, los usuarios simplemente ingresan el número de identificación de una revista y obtienen un desglose visual de los artículos por país y año. El sistema se alimenta de OpenAlex, un índice de código abierto que cataloga cientos de millones de documentos científicos, e integra Problematic Paper Screener (detector de artículos problemáticos), con el fin de resaltar picos inusuales o publicaciones

previamente marcadas por posibles conductas académicas inapropiadas.

El uso de esta plataforma resulta crucial porque los procesos de revisión y eliminación de revistas sospechosas de las grandes bases de datos (como Scopus) pueden tardar meses. Durante ese limbo, muchos investigadores continúan enviando sus trabajos y pagando altas tarifas de publicación sin saber que la revista está bajo escrutinio. Los datos visualizados por la aplicación han evidenciado casos de revistas que saltan de publicar un par de decenas de artículos a cientos de ellos en un solo año, cobrando hasta 1 200 dólares por texto, mientras siguen anunciando falsamente su indexación en sitios de prestigio.

A la par de este sistema, su creador lanzó también Author Trends, un sitio enfocado en analizar el historial de investigadores individuales mediante el rastreo de sus citas, retractaciones y posibles anomalías.

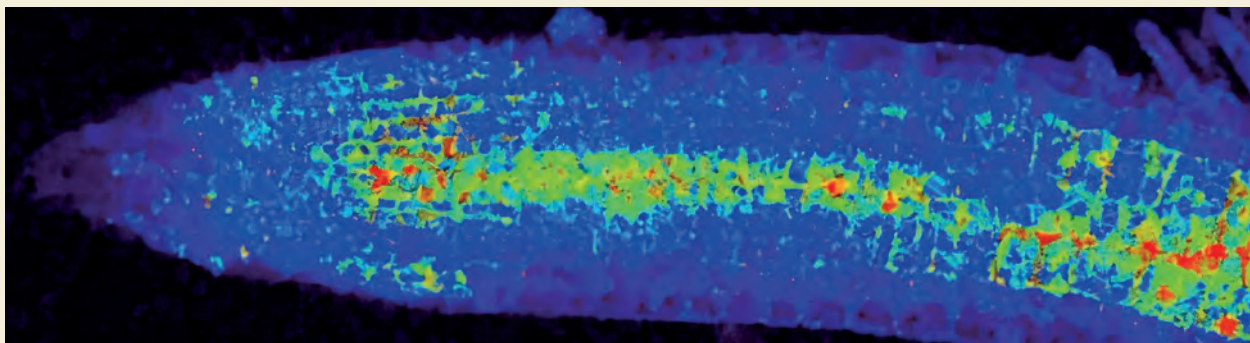
Aunque estas herramientas de la información no pretenden dictaminar de forma definitiva si una revista o autor son problemáticos, representan un excelente primer filtro de advertencia. Su adopción podría ayudar a investigadores, universidades y agencias de financiamiento a tomar decisiones mucho más informadas, protegiendo así el rigor y la integridad de la ciencia.



Más información

M. Basu (2026), "Tool flags suspicious journals before researchers submit papers", *Nature* [en línea]. Disponible en: <<https://www.nature.com/articles/d41586-026-01707-1>>.

Journal Trends brinda la posibilidad de dar seguimiento a artículos y revistas científicas. Crédito: Freepik.



Raíz de *Arabidopsis* con espectro de color que muestra diferentes concentraciones de glucosa. Crédito: Rotem Matosevich.

Azúcar de emergencia para reparar a las plantas

Cuando una planta sufre algún daño, ya sea por una tormenta, el ataque de un animal o las tijeras de podar de un jardinero, se enfrenta a un desafío inmediato: cómo entregar la energía suficiente a la zona herida para reconstruir el tejido perdido. Un nuevo estudio revela el mecanismo biológico con el que las plantas resuelven este problema.

Un equipo de investigación, liderado por Rotem Matosevich e Idan Efroni de la Universidad Hebrea, descubrió que las lesiones desencadenan un rápido desvío de azúcares. Las plantas dirigen activamente esta energía hacia los tejidos dañados, justo donde los procesos de reparación y regeneración están en marcha.

Para investigar este fenómeno, los científicos estudiaron la regeneración de raíces en *Arabidopsis thaliana*, una pequeña planta ampliamente utilizada en la investigación biológica. Comprobaron que el éxito de la regeneración depende de los azúcares producidos por la fotosíntesis, y que un suministro limitado puede ralentizar la reparación.

Posteriormente, utilizaron un nuevo sensor de glucosa fluorescente adaptado, llamado *Glifon*, para rastrear el movimiento del azúcar en tiempo real dentro de plantas vivas. Esta tecnología les permitió observar un hallazgo sorprendente: aunque la rege-

neración dependía de la sacarosa que llegaba desde otros tejidos fotosintéticos, era la glucosa la que se acumulaba específicamente cerca de la herida.

Experimentos adicionales demostraron que las lesiones activan de manera rápida los genes implicados en el transporte y metabolismo del azúcar. Estos genes son los encargados de redirigir los recursos energéticos hacia la zona afectada, una respuesta vital cuando el suministro general es bajo.

Estos hallazgos ofrecen una nueva perspectiva sobre cómo las plantas deciden a dónde enviar sus limitados recursos energéticos, revelando un sistema sofisticado que canaliza rápidamente el combustible hacia donde más se necesita. Además de introducir una nueva y poderosa herramienta visual, este conocimiento podría ayudar a los científicos a comprender mejor cómo los cultivos se recuperan de daños físicos causados por viento, granizo, plagas o maquinaria agrícola, así como a lidiar con el estrés ambiental derivado de las sequías y el calor extremo.

Más información

I. Efroni *et al.* (2026), "Wounding-induced redirection of sugar transport fuels tissue repair", *Proceedings of the National Academy of Sciences*. Disponible en: <https://doi.org/10.64898/2026.01.13.699335>.

Noticias de la Academia Mexicana de Ciencias



Falleció la doctora Deborah Dultzin, miembro destacado de la AMC y del Instituto de Astronomía de la UNAM

La Academia Mexicana de Ciencias y en particular el Comité Editorial de la revista *Ciencia*, lamenta profundamente el fallecimiento de la doctora Deborah Dultzin, quien formó parte de este comité durante más de una década. Investigadora emérita del Instituto de Astronomía de la UNAM, su trabajo se centró en el estudio de los núcleos activos de galaxias, de las propiedades de los cuásares y de la interacción entre conjuntos de galaxias. Transmitió su gran entusiasmo por la ciencia a jóvenes talentos que siguen activos en la investigación en México y en otros países. Sus charlas de divulgación fueron muy apreciadas, dada su carismática personalidad. La recordamos como una gran mujer, entusiasta y llena de vitalidad.



Realiza la AMC ceremonia de ingreso de nuevos miembros regulares y jóvenes académicos, así como entrega de premios

El pasado 29 de mayo se realizó, en el Auditorio Alfonso Caso de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), la ceremonia de ingreso de nuevos miembros regulares y jóvenes académicos a la Academia Mexicana de Ciencias (AMC), así como la entrega de Premios de la AMC.

La doctora Telma Castro Romero, vicepresidenta de la AMC, resaltó la integración, por primera vez, de 117 jóvenes académicos, una iniciativa diseñada para impulsar a investigadores en consolidación. Asimismo, dio la bienvenida a 73 miembros regulares que ingresaron en la convocatoria 2024, así como a 94 nuevos miembros regulares que ingresaron en 2025.

Por su parte, José Seade Kuri, presidente de la AMC, enfatizó que la renovación generacional de la ciencia en nuestro país es apremiante para enfrentar desafíos como el cambio climático, la transición energética, la desigualdad y la salud pública.

En su intervención, el doctor Gustavo Pacheco López, rector general de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), reflexionó sobre la necesidad urgente de apuntalar la inversión en ciencia frente al panorama regional en América Latina.

En el acto se entregaron también los Premios de investigación para jóvenes 2025, y los Premios de la Academia a las mejores tesis de doctorado en Ciencias Sociales y Humanidades 2025.

La doctora Rosaura Ruiz Gutiérrez, secretaria de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación del Gobierno de



De izquierda a derecha: Telma Castro Romero, María Soledad Funes Argüello, José Seade Kuri, Rosaura Ruiz Gutiérrez, Leonardo Lomelí Vanegas, Ana Covarrubias Velasco, Gustavo Pacheco López y Alberto Sánchez Hernández. Fotografía: Eduardo González / AMC.

México, reconoció que si bien el país cuenta con investigación básica de excelencia, existe un rezago importante en tecnología.

Finalmente, el rector de la UNAM, Leonardo Lomelí Vanegas, celebró la creación de la categoría de Jóvenes Académicos, por considerarla “una acción visionaria enfocada al relevo generacional”.

En la ceremonia también estuvieron presentes Ana Covarrubias Velasco, presidenta de El Colegio de México; María Soledad Funes Argüello, coordinadora de la Investigación Científica de la UNAM, y Alberto Sánchez Hernández, director general del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (Cinvestav).

La AMC impulsa el desarrollo de competencias digitales con IA

Con el propósito de cerrar la brecha tecnológica y fortalecer las competencias digitales en el entorno laboral y académico, la AMC organizó los talleres “Herramientas digitales con IA: productividad, comunicación y creatividad”, una iniciativa que se llevó a cabo con el invaluable apoyo de la Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación (DGTIC) de la UNAM.

Esta serie de capacitaciones en línea, realizada del 15 al 19 de junio, ofreció a los participantes soluciones breves y orientadas a resultados para optimizar su trabajo diario. A través de módulos enfocados en escritura inteligente, diseño de presentaciones visuales, creación de videos y análisis de investigación, los asistentes aprendieron a integrar la inteligencia artificial en sus actividades cotidianas de manera eficiente, promoviendo al mismo tiempo un uso ético y seguro de la información en la era digital.

Más información: <https://amc.edu.mx/talleres/>.



CITA

(Ciencia, Innovación, Tecnología y Academia)

La AMC y el Centro de Ciencias de la Complejidad (C3) de la UNAM coordinan CITA (Ciencia, Innovación, Tecnología y Academia), espacio mensual en el que se reúnen miembros de distintas comunidades de la ciencia, la tecnología, la innovación, la comunicación de la ciencia y el público no especializado para intercambiar perspectivas sobre temas científicos y tecnológicos relevantes y coyunturales.

Los encuentros del programa de CITA son coordinados por Julia Tagüña Parga, Coordinadora de Comunicación del C3, investigadora emérita del Instituto de Energías Renovables de la UNAM y miembro de la AMC. El formato es presencial y también se transmite por los canales de YouTube de la AMC y del C3.

Las conferencias más recientes son:

- 24 de marzo de 2026
"Revista *Debate feminista*: cómo se estudia la complejidad del feminismo"
Hortensia Moreno
CIEG, UNAM
<https://www.youtube.com/live/GhclgZVcB3c>
Al término de la conferencia, se invitó a un panel de especialistas para comentar sobre el tema. Participaron Estela Serret de la UAM Azcapotzalco; Gabriela Méndez Cota de la Ibero, y Eva Alcántara de la UAM Xochimilco, con Julia Tagüña, coordinadora de CITA, como moderadora.



- 18 de abril de 2026
"Podcasts de ciencia y academia: cómo narrar lo complejo al oído"
https://www.youtube.com/live/FN_8NxiMIXc
En la que participó un panel de especialistas para comentar sobre el tema. Tomaron parte en el evento Aleida Rueda



y Cecilia Lartigue de Historias Complejas; Omar Zamora de Tejiendo Historias; Maru Lombardo de Fiebres Lúcidas; Isaac Torres de Ciencia por México; Alejandra Ortiz Medrano de Mándarax, y Agustín Ávila Casanueva de Mutante, con Julia Tagüña, coordinadora de CITA, como moderadora.

- 26 de mayo de 2026
"Renovación en la Academia Mexicana de Ciencias. Propuestas de candidatos a su vicepresidencia"
<https://www.youtube.com/live/35lxD3Kf0j8>
En la que participaron Silvia Elena Giorguli Saucedo de El Colegio de México y Rafael Bojalil Parra de la UAM Xochimilco, con Julia Tagüña, coordinadora de CITA, como moderadora.

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

Continúan las pláticas que, a través de las redes sociales de la revista *Ciencia*, dictan diversos autores que han contribuido en diferentes números de la misma. Las charlas más recientes han sido:



- 24 de marzo de 2026
"Más allá del embarazo: salud, lactancia y futuro en la madre adolescente"
Gabriela Chico Barba

María Eugenia Flores Quijano
Alejandro Rosas Balan
Instituto Nacional de Perinatología
<https://www.youtube.com/live/zb1pGPewtdw>



- 14 de abril de 2026
"Cactus: modelos únicos para la ciencia"
Brenda López Ruiz
Jardín Botánico de la UNAM
<https://www.youtube.com/live/zb1pGPewtdw>



- 12 de mayo de 2026
"Más allá de la transcripción: funciones del ARN"
Brandon Bautista Becerril
Ramcés Falfán Valencia
Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias
Roberta Salinas Marín
Universidad Autónoma del Estado de Morelos
<https://www.youtube.com/live/lbPIXpVDuk>

- 19 de mayo de 2026
"Mundos nanoscópicos, virus y armonía"
Cristian Felipe Cruz García
Instituto de Física de la UNAM
Luis Alfonso Vaca Domínguez
Instituto de Fisiología Celular, UNAM
<https://www.youtube.com/live/NL0eABzDbrY>



- 26 de mayo de 2026
"Sustancias químicas: producción y uso contra el envejecimiento"
Carlos O. Castillo Araiza
Silvestre Alavez
Universidad Autónoma Metropolitana
<https://www.youtube.com/live/CgprTtnGSPw>



- 2 de junio de 2026
"¿Cómo planear ciudades y sus sistemas de transporte?"
Dorian Antonio Bautista Hernández
Instituto de Investigaciones Económicas, UNAM
<https://www.youtube.com/live/QoH-ZCNwjRw>

Webinar

"Tu mundo con ciencia"

Continúa el ciclo de conferencias "Tu mundo con ciencia", impartido por exbecarias ganadoras de las Becas para Mujeres en la Ciencia L'Oréal-Unesco-AMC. Las pláticas se llevan a cabo el segundo jueves de cada mes y son transmitidas por los canales de las redes sociales de la AMC. Las conferencias están dirigidas a jóvenes de nivel bachillerato, para fomentar vocaciones científicas. En el mes de agosto de 2025 inició su quinta temporada. Las conferencias más recientes son:

- 9 de abril de 2026
"Plaquetas: sensores ocultos del cáncer"
Mayra Cecilia Suárez Arriaga
Inmegén
https://www.youtube.com/live/e6in5qMN_j4
- 14 de mayo de 2026
"Genes que escapan y su rol en enfermedades autoinmunes"
Montserrat Ivonne Morales Rivera
Inmegén
<https://www.youtube.com/live/AFkPzXHbgug>



- 11 de junio de 2026
"El arte de estudiar el mar: pasión, ciencia y fondo marino"
Elva Escobar Briones
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM
<https://www.youtube.com/live/xsD5VqNp2rE>



En nuestro próximo número de
octubre-diciembre de 2026

NOVEDADES CIENTÍFICAS



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

