

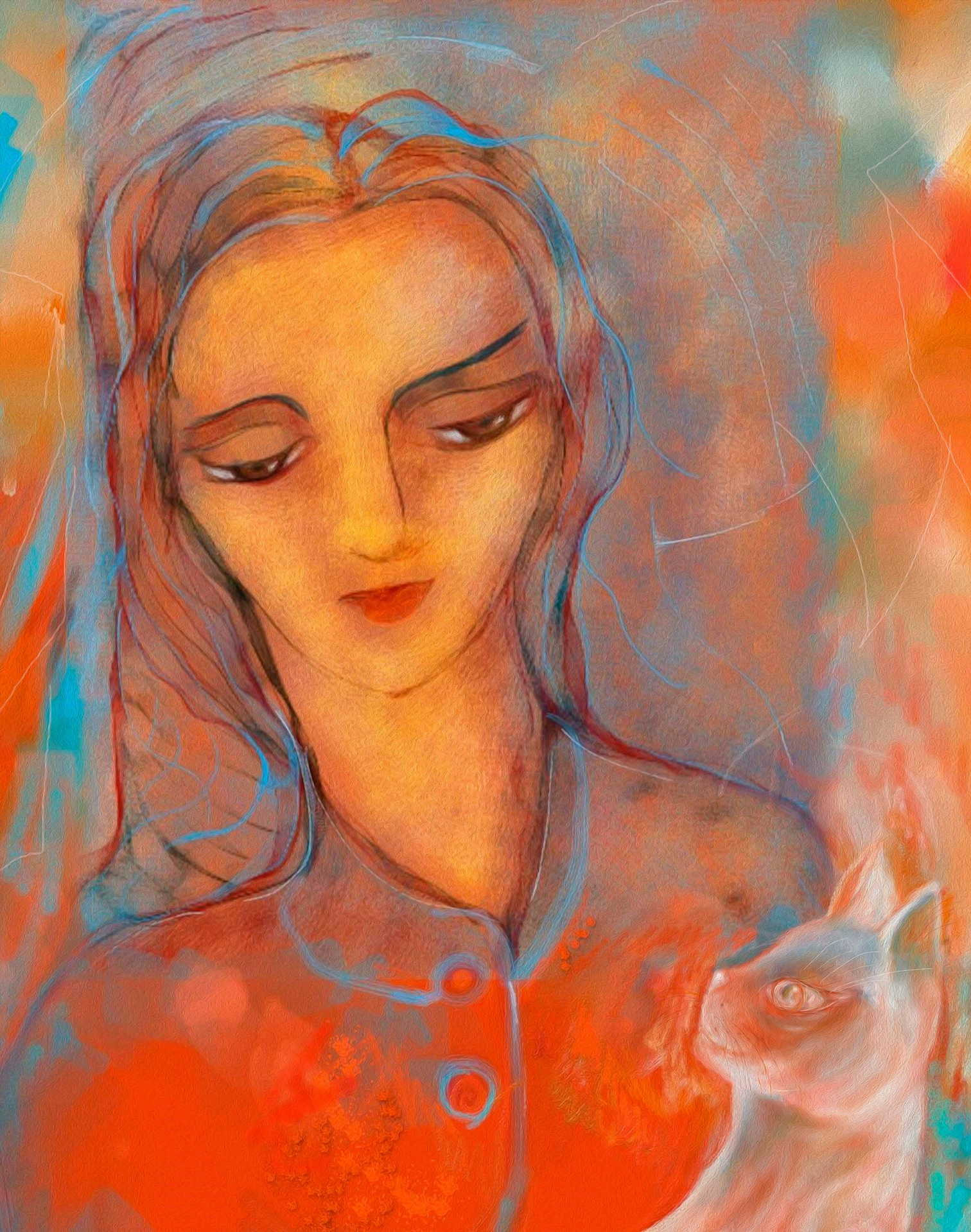
1 elementos

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA • No. 143 • Volumen 33 • julio - septiembre 2026 • \$40.00

CONAHCYT
Incluida en el Índice de Revistas
Mexicanas de Divulgación Científica
y Tecnológica del CONAHCYT



Lectura y neuronas: una danza invisible | Las neurociencias en México a finales del siglo XX | El origen de la vida: ¿todo lo que hay que saber? | *Dr. Strangelove* o cómo aprendimos a amar la bomba... | El potencial de reposo como estructura disipativa... | Resistencia antimicrobiana: de dónde venimos, dónde nos encontramos... | Tecnologías reproductivas para conservar vida | Diagnóstico sin dolor: termografía médica con inteligencia artificial | Los triterpenos como aliados en la lucha contra el cáncer | Triquinosis: una enfermedad difícil de erradicar | Hongos: nutrición, compuestos bioactivos y salud humana | Almacenamiento del calor solar... | Construir deconstruyendo... | Bacterias y vainilla: del sustrato al aroma | De los patios familiares a los corredores biológicos... | Nematodos entomopatógenos: una biotecnología para el control sostenible... | Cambio global y resiliencia ecológica de las redes de interacción bióticas | La fresa y su lenguaje químico | Entre el miedo y la fascinación... | Obra gráfica: Malú Méndez Lavielle



S U M A R I O



BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
rectora, Ma. Lilia Cedillo Ramírez
secretario general, Damián Hernández Méndez
vicerector de investigación y estudios
de posgrado, Ygnacio Martínez Laguna

ELEMENTOS

www.elementos.buap.mx

revista trimestral de ciencia y cultura
número 143, volumen 33, julio-septiembre de 2026

director, Enrique Soto Eguibar

subdirector, José Emilio Salceda

diseño y producción gráfica, Mirna Guevara

corrección de estilo, Emilio Salceda y Leopoldo Noyola

sitio web y laboratorio multimedia, Leopoldo Noyola

redes sociales, Mirna Guevara

administración y logística, Lorena Rivera e Ileana Gómez

redacción, 14 Sur 6301, Ciudad Universitaria

Apartado Postal 406, Puebla, Pue., C.P. 72570

email: esoto24@gmail.com

consejo editorial, Itziar Aretxaga (CAB CSIC-INTA, España),

Beatriz Eugenia Baca (ICUAP, BUAP),

María Emilia Beyer Ruiz (DGDC, UNAM),

María de la Paz Elizalde, (ICUAP, BUAP),

Ana Lidya Flores Marín (IBERO Puebla),

Marcelo Gauchat (FUNDACIÓN FORMA, A. C.),

Sergio Segundo González Muñoz (COLPOS Montecillo),

Federico Méndez Lavielle (Facultad de Ingeniería, UNAM),

Jesús Mendoza Álvarez (Instituto Politécnico Nacional),

Ricardo Moreno Botello (Ediciones de Educación y Cultura),

Francisco Pellicer Graham (Instituto Nacional de Psiquiatría),

Adriana Pliego Carrillo (Facultad de Medicina, UAEM),

Leticia Quintero (Facultad de Ciencias Químicas, BUAP),

José Emilio Salceda (Instituto de Fisiología, BUAP),

Gerardo Torres del Castillo (ICUAP, BUAP), Catalina Valdés Baizabal

(Laboratorio de Neurobiología Celular,

Universidad de La Laguna), Enrique Vergara (ICUAP, BUAP)

obra gráfica, © Malú Méndez Lavielle

Portada, © Luna roja.

2° de forros, © Espíritu.

CINTILLO LEGAL

ELEMENTOS, Año 41, No. 143, julio a septiembre de 2026, es una publicación trimestral editada por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, con domicilio en 4 Sur número 104, Col. Centro, C. P. 72000, Puebla, Pue., y distribuida a través de Revista Elementos, con domicilio en Av. 14 Sur No. 6301, Col. San Manuel, Puebla, Pue. C. P. 72570. Tel. 222 229 55 00 ext. 7316. Editor responsable Dr. Enrique Soto Eguibar, esoto24@gmail.com. Reserva de derechos al uso exclusivo 04-2018-101113435900-102. ISSN 0187-9073, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor de la Secretaría de Cultura. Este número se terminó de imprimir en junio de 2026. Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.



ÍNDICE DE REVISTAS MEXICANAS
DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA



- Lectura y neuronas: una danza invisible 3
Raúl Marcó del Pont Lalli
- Las neurociencias en México a finales del siglo XX 9
Francisco Pellicer Graham
- El origen de la vida: ¿todo lo que hay que saber? 15
José Antonio González Oreja
- Dr. Strangelove* o cómo aprendimos a amar la bomba: ciencia, poder y paranoia 23
Alberto Vázquez Salazar
- Equinoccio*. Obra gráfica de Malú Méndez Lavielle 29
- El potencial de reposo como estructura disipativa: más allá del modelo de equilibrio 33
Miguel Serrano-Reyes, José Bargas
- Resistencia antimicrobiana: de dónde venimos, dónde estamos y hacia dónde vamos 39
Alexis Tizatl-Chazarí, José Carlos Arroyo Kuribreña
- Tecnologías reproductivas para conservar vida 47
Angélica Trujillo Hernández
- Diagnóstico sin dolor: termografía médica con inteligencia artificial 53
Francisco Jacob Ávila Camacho, María de la Luz Delgadillo Torres
- Los triterpenos como aliados en la lucha contra el cáncer 57
Giovanny Aguilera-Durán, Ma del Refugio Cuevas-Flores
- Triquinosis: una enfermedad difícil de erradicar 61
Nancy Edith Rodríguez Garza
- Hongos: nutrición, compuestos bioactivos y salud humana 67
Zoha Bautista-Montero, Aleyda Pérez-Herrera
- Almacenamiento del calor solar: una tecnología para el suministro energético continuo 75
Luis Adrián López Pérez, Armando Huicochea Rodríguez
- Construir deconstruyendo: síntesis de alcaloides a partir de simples N-heterociclos 81
Fernando Sartillo-Piscil
- Bacterias y vainilla: del sustrato al aroma 89
Esmeralda Escobar Muciño
- De los patios familiares a los corredores biológicos: reptiles y vegetación ribereña en México 99
Marco T. Oropeza-Sánchez, Roberto Munguía-Steyer
- Nematodos entomopatógenos: una biotecnología para el control sostenible de plagas en la agricultura 105
Gobinath Chandrakasan
- Cambio global y resiliencia ecológica de las redes de interacción bióticas 111
Jorge E. Ramírez-Albores, Alina Gabriela Monroy-Gamboa
- La fresa y su lenguaje químico 119
Neby M. Mérida-Torres, Samuel Cruz-Esteban
- Entre el miedo y la fascinación: repensar nuestra relación con la fauna local 125
Iván Flores-Santiago, Martha L. Baena

© Malú Méndez Lavielle. *Luna con su gato.*



Lectura y neuronas: una danza invisible

Raúl Marcó del Pont Lalli

Vas en el camión, abres un poema en el celular y resaltas una línea que te estremece; en ese instante, sin que lo notes, tu cerebro pone en marcha una coreografía compleja: ojos que saltan por la pantalla, redes del lenguaje que negocian sentidos, circuitos motores que “ensayan” acciones, y sistemas sensoriales que recrean olores, texturas y voces. La neurociencia puede seguir esa danza con resonancia magnética funcional y mostrarnos, momento a momento, cómo se encienden y coordinan esas redes. Este artículo presenta una síntesis apretada sobre lo que ocurre “por dentro” cuando leemos –por placer o con una lupa analítica–, por qué ciertos textos nos enganchan como si nos contaran una historia al oído, y hasta dónde podemos confiar en esas imágenes del cerebro para comprender y mejorar nuestras prácticas de lectura.

DENTRO DE TU CEREBRO LECTOR

Que la práctica lectora nos acompañe desde hace varios milenios no significa que sea fácil de definir. Cuando, a mediados del siglo pasado, su estudio adquirió credenciales académicas, podría haberse esperado un consenso conceptual; ocurrió lo contrario. Cuanto más relevante se volvió, más se multiplicaron las formas de entenderla.

Esa expansión cambió el foco: de analizar la lectura como verbo (un acto) se pasó a tratarla también como sustantivo

figurado (una “lectura” de cualquier objeto). El resultado fue una taxonomía incesante de estilos: profunda, descriptiva, denotativa, distante, hiper, justa, simple, paranoica, reparadora, lenta, superficial, sintomática, acrítica e incluso amplia (Rubery y Price, 2022). Esta diversidad no es mero capricho terminológico: refleja prácticas, propósitos y contextos distintos.

Las consecuencias de leer –o de no leer– no se limitan a la teoría. La investigación empírica ha mostrado que la falta de estimulación lingüística temprana podría dejar huellas profundas. Maryanne Wolf, referente del enfoque neurolingüístico, advierte que la desigualdad en oportunidades de lenguaje contribuye a un sistema de clases “invisible”. Con el paso de los años, los niños que crecen en hogares ricos en conversaciones, lectura y escritura se distancian de quienes no cuentan con ese entorno. Un estudio muy citado estimó que, hacia los cinco años, un niño de clase media puede acumular una exposición verbal a decenas de millones de palabras superior a la de un niño en desventaja (Wolf, 2008).

A la par de estas evidencias sociales, una nueva ola tecnológica comenzó a mirar “por dentro” la experiencia lectora. A inicios de este milenio, los estudios con resonancia magnética funcional (RMf) captaron la atención pública con imágenes de cerebros que se “iluminaban” mientras los participantes leían.

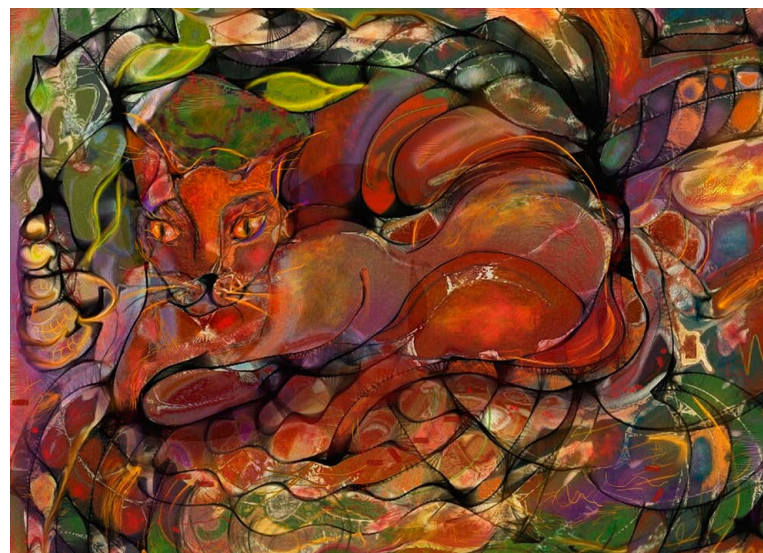
Maryanne Wolf lo resume así: la lectura reorganiza conexiones entre estructuras preexistentes, aprovecha la especialización para el reconocimiento de patrones y, al automatizar procesos, libera recursos para formas de pensamiento más complejas. “En otras palabras, la lectura demuestra cómo nuestro desarrollo cognitivo, en permanente evolución, se basa en principios elementales de la organización cerebral” (Wolf, 2008). Y, como nos recuerda Stanislas Dehaene, reconocido neurocientífico cognitivo francés, más notable resulta que tal hazaña se haya logrado con circuitos “imperfectamente adaptados” a la lectura: visión de baja resolución para grafemas diminutos, una curva de aprendizaje empinada y una incómoda tendencia a la simetría en espejo (2014, p.

357). Es decir, leemos gracias y a pesar de un cerebro que no nació para ello.

Todo lo anterior fue solo el comienzo de una transformación más amplia en la manera de pensar el “cerebro lector”. Hoy empiezan a aparecer resultados que la fase anterior apenas insinuaba. Vale la pena preguntarse qué aportan y hacia dónde nos llevan. No es nuevo afirmar que los libros “crean mundos” y despiertan emociones; lo novedoso es observar cómo ocurre esto en tiempo real. Con la RMf podemos seguir cómo fluctúa la actividad cerebral mientras leemos y cómo, palabra a palabra, se encadenan sentimientos, imágenes e interpretaciones. Además, al enfrentarnos con ficción –novelas o poemas, a menudo de autores canónicos, una selección basada en razones metodológicas– no solo decodificamos signos: ensayamos mentalmente acciones y situaciones. Esta simulación, que algunos trabajos recientes también describen en el sueño (Zadra y Stickgold, 2021), sugiere que el cerebro utiliza estrategias comunes para explorar posibilidades, ya sea al dormir o al leer.

En suma, pasamos de concebir al lector como un viajero que traza rutas singulares sobre un territorio ajeno a verlo, también, como un organismo que reconfigura sus redes para hacer posible esa travesía. Entre ambas imágenes –la cultural y la neuronal– hay continuidad: la pluralidad de estilos,

© Malú Méndez Lavielle. *Canela*.





© Malú Méndez Lavielle. Buena compañía.

contextos y fines de lectura encuentra su correlato en la plasticidad del cerebro. Y si la práctica es plural y el cerebro es plástico, entonces la tarea científica y educativa es doble: ampliar oportunidades de lectura desde la infancia y comprender, con herramientas cada vez más precisas, cómo distintas maneras de leer abren distintos caminos para pensar.

Veamos lo que nos dicen algunos trabajos recientes al respecto, como los de Dehaene (2014), Johns (2023), Phillips *et al.* (2022) o Price (2022), que ofrecen un abanico sorprendente de resultados. También es muy recomendable revisar la plática del neurocientífico francés Stanislas Dehaene, uno de los líderes mundiales en su campo.¹

LEER ES SIMULAR: EL CEREBRO COMO ESCENARIO

Cuando un texto dice “Julio pateó la pelota” o “María levantó el vaso”, se activa la corteza motora, la misma red que usaríamos para mover piernas y brazos. Y esta simulación no es vaga o deducida por los investigadores: involucra áreas específicas (por ejemplo, segmentos de la corteza motora vinculados a la mano o el pie) según el verbo o la escena. Se ha pasado de identificar con precisión “qué parte del cerebro se enciende” cuando se lee a ‘ver’ cómo el sistema motor, el sensorial y el emocional colaboran con el procesamiento verbal para construir significado.

Hasta aquí nuestro asombro estaría bien servido. Pero hay mucho más. No solo se provoca movimiento simulado, sino que leer convoca sentidos múltiples.

Cuando aparecen palabras con carga sensorial –“canela”, “jazmín”, “menta”– se activan regiones olfativas; descripciones de voces ásperas o sedosas involucran no solo la corteza auditiva sino también zonas sensoriales asociadas al tacto. Así, una metáfora no es mero adorno: es una instrucción que combina sistemas sensoriales y emocionales para fabricar un entorno multisensorial en el cerebro del lector. Por eso un gran pasaje literario “se siente”: porque, al traducir frases en sabores, texturas y sonidos imaginados, integra redes neuronales diversas y las hace interactuar. Y cuanto más precisa y evocadora es la escritura, más rica es la simulación que el lector pone en marcha.

Detrás de todo esto hay una coreografía compleja. Para “ver” letras, la corteza visual primaria descompone trazos y contrastes; nuestros ojos no avanzan de manera continua, sino a pequeños saltos. A la vez, pronunciamos mentalmente, lo que los especialistas llaman subvocalizar: el cerebro activa circuitos motores del habla como si musitáramos el texto. Y, en paralelo, se consultan significados léxicos, se desambiguan sentidos, se relacionan frases y se siguen hilos narrativos. Lejos de ser un flujo lineal, la lectura es procesamiento en paralelo, recursivo y bidireccional: lo que entendemos de una frase reorganiza lo que vimos en la anterior y prepara lo que esperamos en la siguiente. Y eso ocurre tanto si estamos leyendo *El infinito en un junco*, de Irene Vallejo, como una caja de cereales.



© Malú Méndez Lavielle. *Acuáticos*.

Los estudios cuyos resultados estamos relatando se hacen dentro de unas condiciones que distan galaxias de lo que se considera una lectura relajada y placentera: dentro de un ruidoso tubo de resonancia magnética, en el que los sujetos deben estar prácticamente inmóviles, donde deben leer lo que se refleja, a partir de una pantalla, en un espejo, y tienen que tocar un botón para pasar a la siguiente página. Claro que los investigadores de estos temas resultan ser unos optimistas incurables, y consideran que todo esto tiene un lado positivo, ya que pone en evidencia que la lectura está siempre mediada por algún tipo de soporte (papel, pantalla) y que puede llevarse a cabo en el transporte público, en una sala de lectura o en el sofá de tu casa, pero también en un laboratorio.

DOS MODOS DE ATENCIÓN, DOS CARTOGRAFÍAS NEURONALES

Phillips y sus colaboradores (2020) probaron, en su laboratorio en la Michigan State University, dos tipos de lectura de un mismo texto (uno de Jane Austen), donde se les pidió a los sujetos de estudio que se dejaran llevar por la historia o se detuvieran a analizar el estilo, la estructura narrativa, las propuestas formales. En ambos casos, aunque se activaron redes neuronales amplias, en la lectura

atenta se echó mano con mayor intensidad de regiones asociadas a la orientación espacial, el tacto y el movimiento. Ante esto, evitemos una conclusión fácil: la lectura intensiva es mejor que la placentera. Y, en cambio, tal vez debamos aceptar esta otra: distintos objetivos de lectura ponen en marcha combinaciones diversas de procesos cognitivos. Y la evidencia muestra, además, que los patrones de activación variaron entre lectores, es decir, no hay dos cerebros que lean exactamente igual, a pesar de todas las similitudes en el hilo lector.

Otra línea de investigación, en este caso centrada en contar y escuchar historias, ha mostrado un fenómeno llamativo: la actividad cerebral del narrador y la de los oyentes se acoplan con un pequeño desfase temporal, como si compartieran un ritmo. Ese “neuroacoplamiento”, como lo llaman, sugiere, aunque aún queda mucho trabajo por hacer, que relatar y comprender historias crea una experiencia cognitiva compartida: el cerebro del que narra marca una pauta a la que el del oyente (o lector) se engancha. Visto así, la lectura puede entenderse como una conversación diferida entre autor y lectores.

Por otra parte, algo que se investiga hace poco es cómo fluctúa el placer mientras se lee, por ejemplo, poesía. Usando sonetos de diferentes siglos, se les pidió a los participantes que marcaran momentos estéticamente placenteros o desagradables. El resultado: la valoración final de un poema no es un

veredicto único emitido al final, sino la suma –y a veces la compensación– de microexperiencias de gusto y disgusto que se encadenan verso a verso (Phillips *et al.*, 2020).

LO QUE PODEMOS (Y NO PODEMOS)

PEDIRLE A LA NEUROIMAGEN

A pesar de lo llamativo de sus resultados, la RMf no es una ventanilla mágica. Correlaciona el flujo sanguíneo con la actividad (oxígeno, glucosa) que se interpretan como procesos neuronales; ofrece, por tanto, una aproximación indirecta. Además, leer en el escáner no reproduce la comodidad del sillón favorito ni el zumbido discreto de una biblioteca. Estas limitaciones son reales y hay que integrarlas en la interpretación de resultados. Pero, lejos de invalidar el enfoque, lo enriquecen: obligan a definir con cuidado qué fenómeno se estudia (placer, atención, memoria, expectativa), en qué condiciones y con qué criterios se generaliza a otros ámbitos de la vida cotidiana.

CONCLUSIÓN: LEER PARA SEGUIR LEYENDO(SE)

La imagen que emerge es nítida y polícroma: leer activa y coordina múltiples sistemas –visuales, motores,

sensoriales, afectivos– que simulan mundos y nos permiten habitar otras vidas sin levantarnos del sillón. La RMf y métodos afines no capturan toda la experiencia, pero muestran su ritmo interno: la atención que se desplaza, el placer que oscila, las redes que se enganchan. Este conocimiento no devalúa la magia de la lectura; la hace más inteligible y, con ello, más defendible en la escuela, en la universidad, en los medios. A la vez, nos invita a cuidar los entornos de lectura –papel o pantalla– y a cultivar un estilo que convoque sentidos, ideas y emociones. Porque, en última instancia, ese es el corazón de la lectura: una tecnología para sincronizar cerebros, afinar sensibilidades y expandir lo que somos capaces de imaginar.

NOTA

¹ Disponible en BBVA Aprendamos juntos: <https://youtu.be/j9EImcqgnE4?si=haK7VzNODXK8b4KV>.

REFERENCIAS

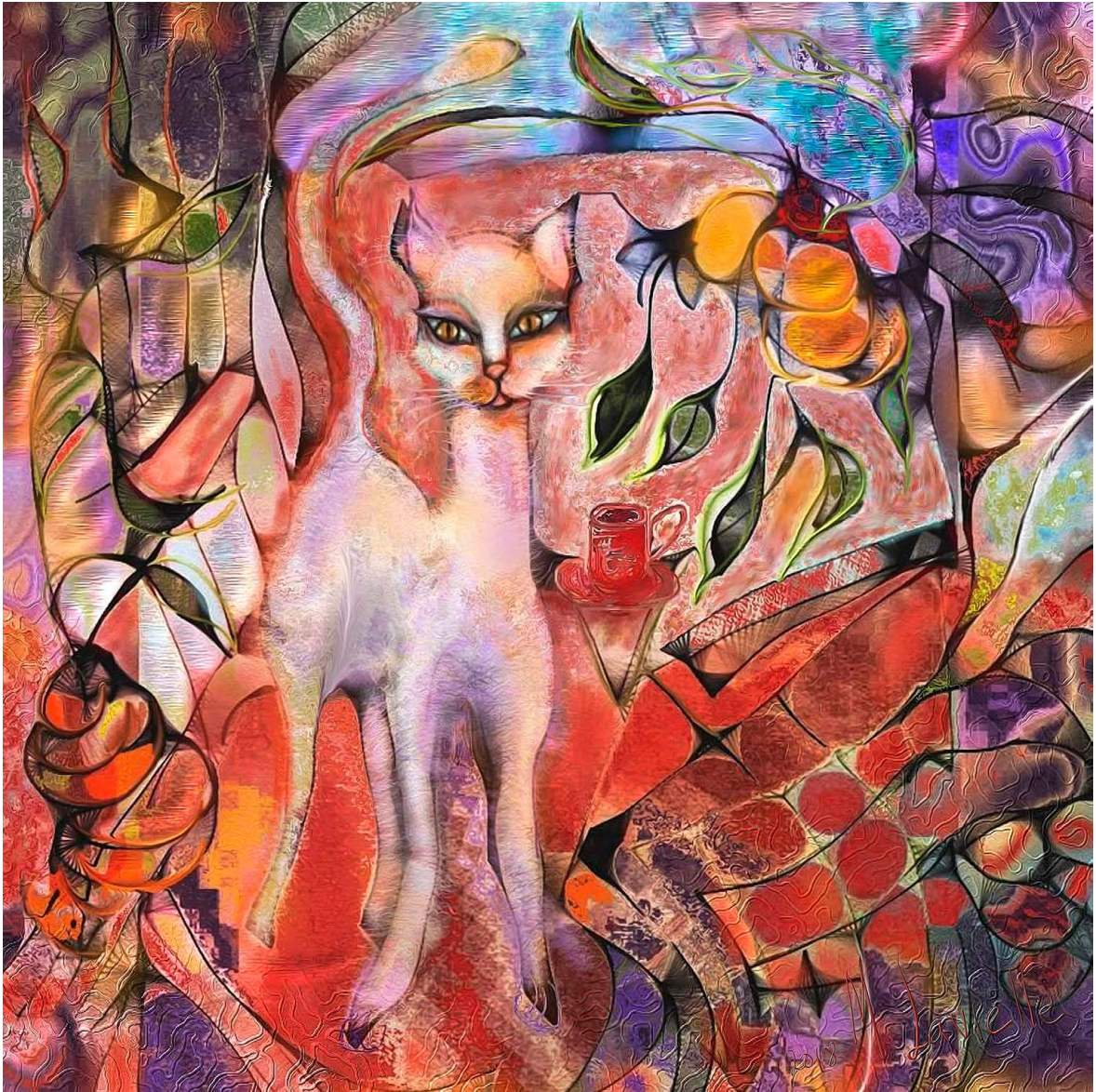
- Cavallo G y Chartier R (2006). *Historia de la lectura en el mundo occidental*. México: Taurus.
- De Certeau M (2000). Leer: una cacería furtiva. En Certeau M, *La invención de lo cotidiano I. Artes de hacer* (pp. 177-189). México: Universidad Iberoamericana, ITESO.
- Dehaene S (2014). *El cerebro lector: Últimas noticias sobre neurociencias de la lectura, la enseñanza, el aprendizaje y la dislexia*. Buenos Aires: Siglo Veintiuno Editores.
- Johns A (2023) *The Science of Reading. Information, Media, and Mind in Modern America*. University of Chicago Press.
- Phillips N *et al.* (2020). Neuroimaged. En Rubery M. y Price L, *Further Readings* (cap. 6). Oxford University Press.
- Price L (2004). Reading: The State of the Discipline. *Book History* 7:303-320.
- Wolf M (2008). *Cómo aprendemos a leer*. Barcelona: Ediciones B.
- Zadra A y Stickgold R (2021). *When Brains Dream: Exploring the Science and Mystery of Sleep*. W. W. Norton.

Raúl Marcó del Pont Lalli
Instituto de Geografía
Universidad Nacional Autónoma de México
edito@geografia.unam.mx

© Malú Méndez Lavielle. Gato azul.



© Malú Méndez Lavielle. *Pierre.*



Las neurociencias en México a finales del siglo XX

Francisco **Pellicer Graham**

Hurgando en un viejo archivero encontré este texto, de hace 25 o 26 años, que, hasta donde mi memoria opera, no publiqué en ningún lado. Después de releerlo, pareciera que las cosas con respecto al tema han estado detenidas en el tiempo, por decir lo menos. Recuerdo que lo escribí para un evento de la Sociedad Mexicana de Ciencias Fisiológicas, y como reitero, no se publicó. A continuación, lo transcribo.

Se ha decidido nombrar al último decenio de este siglo (1990-2000) como la década del cerebro y para esto una pequeña glosa: Silvio O. Conte, miembro del Congreso de los Estados Unidos de América, se convierte en el impulsor de la iniciativa propuesta por varios neurocientíficos de dar visibilidad a las patologías, avances y soluciones relacionadas con lo que yo llamo “la Neurocosa”. A raíz de esta gestión, Conte logró generar un grupo parlamentario denominado National Committee for Research in Neurological and Communicable Disease, lo cual desembocó en la presentación del documento *La década del cerebro*, en junio de 1990, por el presidente de los Estados Unidos George Bush. Esta iniciativa pronto cobró resonancia en el resto del mundo y, por ende, el estudio en las distintas ramas de la neurociencia ha producido una verdadera explosión de datos, mecanismos y teorías emanadas del sistema nervioso.



© Malú Méndez Lavielle. *Dorada*.

Este ensayo propone revisar el contexto cultural y de dónde parten históricamente este cúmulo de disciplinas científicas que en la actualidad hermanan campos que van desde el empirismo viviseccionista experimental (tan atacado irracionalmente hoy en día), hasta la simulación con matemáticas complejas del problema mente-cerebro.

La historia reciente de la fisiología en México que, por supuesto, incluye a la neurofisiología, inicia alrededor del primer cuarto del siglo XX y ha estado marcada por hechos significativos que definen, a mi parecer, cuatro etapas distintas. La primera se caracterizó por lo que yo denominaría la “academia romántica”, un puñado de investigadores que hacían ciencia en un país que había quedado amnésico para la cultura en general y particularmente para la investigación científica; con esto me refiero a que fueron individuos y no las instituciones gubernamentales

las que desarrollaron de manera personal la actividad cultural postrevolucionaria. La excepción puede estar constituida por el movimiento nacionalista, un movimiento cultural comandado desde el gobierno postrevolucionario, que por otro lado no cumplía con las expectativas de cultura del país, sino con las de unos pocos en el poder que reconstruían su versión de cultura, más como una imagen propagandística de sí mismos que con un interés genuino de desarrollo civil. Era un grupo que reinauguraba la tradición del quehacer científico, tradición que había tenido su auge en los últimos años del Porfiriato y que también se había colapsado con la revolución.

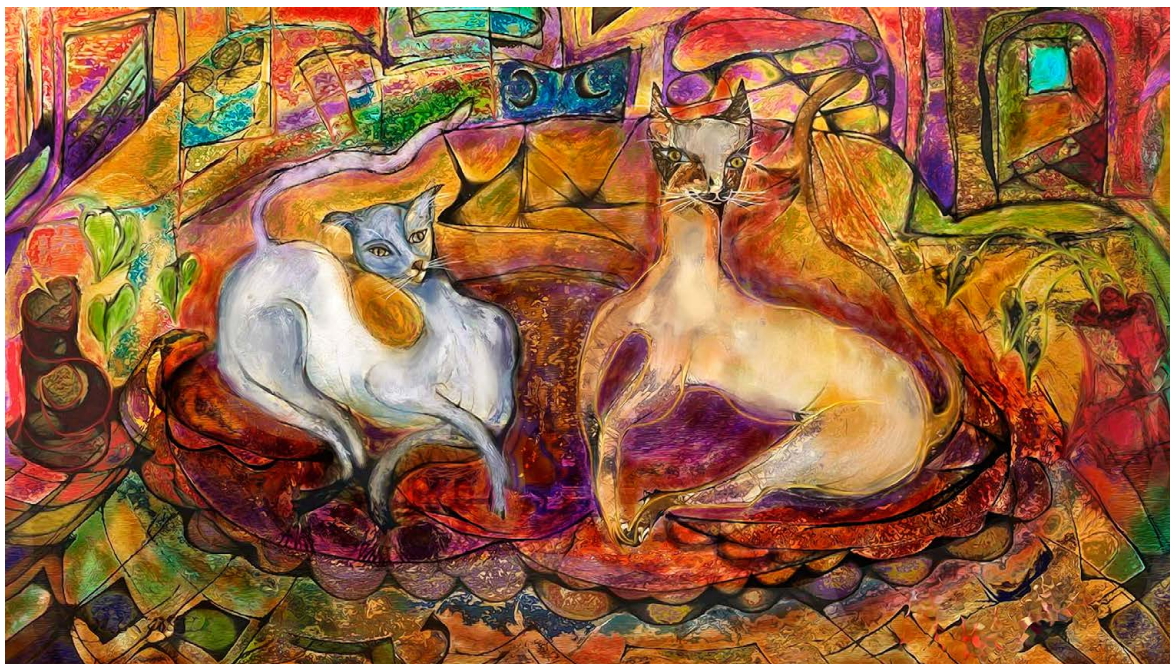
La segunda fue la que produjo una importante reactivación de la ciencia en general, y fue la llegada del exilio español a México. En este ambiente es que el doctor Arturo Rosenblueth encabeza a la Sociedad Mexicana de Ciencias Fisiológicas (SMCF) como su primer presidente y el doctor Efrén C. del Pozo, su primer secretario, el cual la apoyó desde su

puesto de secretario general de la UNAM. El primer congreso de la SMCF se llevó a cabo en 1958, en la biblioteca de la Facultad de Medicina en el actual campus de la ciudad universitaria. El academismo, la efervescencia y el crecimiento enmarcaron esta segunda etapa, en donde el único título de nobleza que se necesitaba era el de la pasión por la ciencia.

La tercera etapa está marcada por la creación en 1972 del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), que históricamente tiene dos antecedentes: la fundación en 1943 de la Comisión Impulsora y Coordinadora de la Investigación Científica (CICIC), de la cual el eminente físico Manuel Sandoval Vallarta fue protagonista e iniciador y que a la postre se transformaría en el Instituto Nacional de Investigación Científica (INIC), que a su vez dio paso al CONACyT. Ciertamente, los antecedentes y el CONACyT mismo fueron concebidos por un grupo de importantes científicos nacionales, pero también es cierto que el modo de operarlo y la injerencia del gobierno han sido definitivas y definitorias en la forma de hacer ciencia. Se favorecen los proyectos académicos de maestría y doctorado en el país, el estado se convierte en el mecenas y se establecen las prioridades nacionales y el plan de

desarrollo para la ciencia. Este nuevo marco favoreció el clanismo y el reconocimiento de estirpes académicas que facilitarían el apoyo; finalmente había recursos que repartir, pero el costo ha sido ceñirse al control y el burocratismo; se cambió el romanticismo de la primera etapa por el ejercicio de una ciencia “pragmática y eficiente”.

La cuarta etapa es el hecho que obliga a un cambio aún más dramático: la creación en 1984 del Sistema Nacional de Investigadores (SNI), en parte por la emergencia del estado financiero de un país con una deuda externa e interna en el límite de la deserción, en lo que respecta a los salarios de los investigadores y a las becas de los estudiantes de posgrado; medida que, en principio, detendría la fuga de cerebros al extranjero, la cual ya estaba sucediendo, con el problema del desmantelamiento de la plantilla académica que tanto trabajo había costado formar, y por otra parte la regulación de la productividad científica impuesta o “recomendada” por organismos extranjeros de países que eran o son nuestros acreedores y que nos siguen financiando. Esta cuarta etapa produjo una fiebre de productividad contra el tiempo donde, para principiar, solo los miembros de los clanes preexistentes



y financiados por CONACyT se encontraban en posición de acceder a alguno de los niveles del SNI (que está constituido en un sistema de jerarquías). Esto ha cambiado la conducta de un buen número de miembros de la comunidad científica: el acceder a alguno de los niveles del SNI. En términos prácticos significa una compensación salarial a expensas de la producción (que no de la productividad) y que tiene efectos colaterales perniciosos, algunos de los cuales ya se presentan en nuestras comunidades científicas y que van desde la fragmentación de la investigación con el fin de publicar más, hasta la invención y manipulación de los resultados experimentales desencadenada por las presiones que se ejercen para el financiamiento de los proyectos, lo cual ha detonado las alarmas de la ética en el quehacer científico.

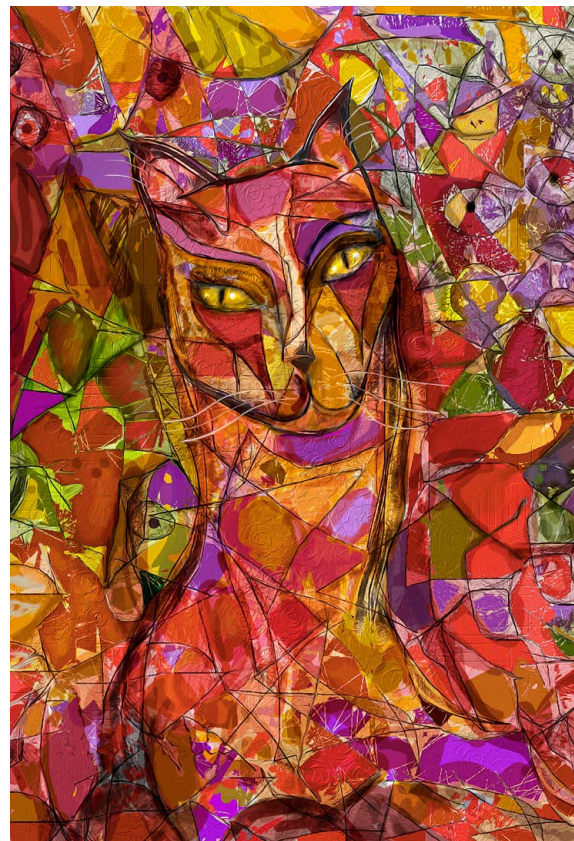
¿Qué hay de la parsimonia, la reflexión, los seminarios, la charla de café, ese “divino ocio” que ha acompañado a las grandes creaciones culturales: *Las señoritas de Aviñón*, *El pájaro de fuego*, *Historias de cronopios y de famas*, los espacios arquitectónicos de Barragán o la cocina de doña Elpidia en Oaxaca? Por último, tenemos ante nosotros, como país, el inicio del ciclo sexenal gubernamental, en donde todo se reaprende, se reinaugura, se reimplanta y tal parece que la amnesia vuelve a florecer. Para este inicio se rumora la creación de la Secretaría de Ciencia y Tecnología y la pregunta es: ¿quiénes y cómo se van a dirigir los destinos de esta parte importantísima de la cultura? ¿La Sociedad Mexicana de Ciencias Fisiológicas se seguirá adaptando o asumirá una postura de vanguardia? La decisión está en nosotros mismos.

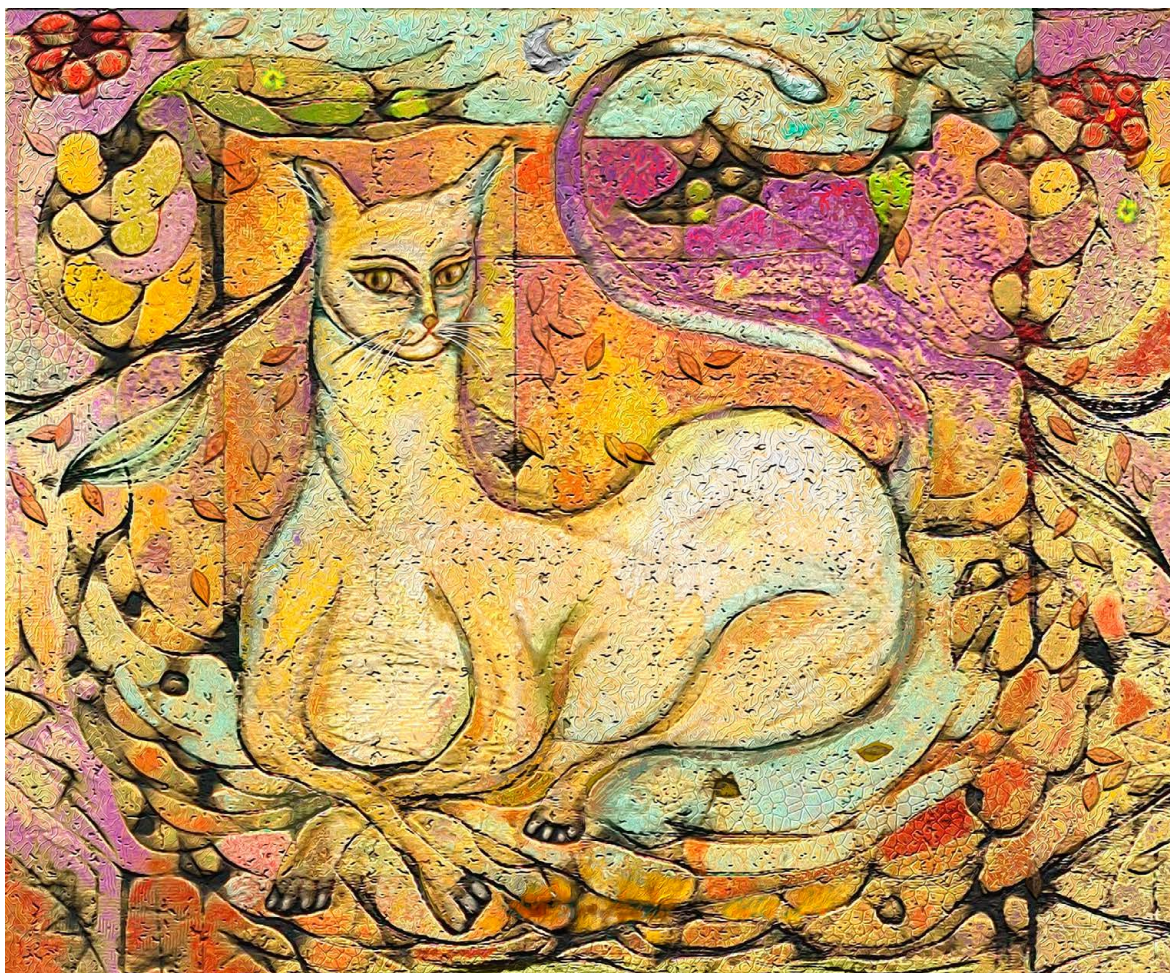
Hasta aquí el texto arqueológico. De forma reciente, cuando me han preguntado cómo veo la política científica del gobierno y del país en general, he respondido: “los países que no son capaces de producir su propia cultura, y con esto me refiero a producir arte, literatura, gastronomía, arquitectura, ciencia, tecnología, por solo citar algunos de los ingredientes que conforman la cultura, están condenados a comprarla y, lo que es peor, están condenados

a comprar lo que nos vendan”; y para estar acorde con los vientos que soplan, con los aranceles que nos impongan... Si el gobierno no favorece, genera y jerarquiza las políticas de desarrollo necesarias para propiciar esta cultura, generará dependencia y abstinencia catastrófica; un ejemplo sensible y de mucho peso tecnológico-científico, de gran repercusión en la salud y por ende en el bienestar social, es la producción de vacunas en nuestro país.

Al respecto hemos tenido recientemente dos pandemias: la ocasionada en el 2009 por el virus de influenza A H1N1, y la segunda diez años después, producida por un coronavirus llamado SARS-CoV-2, esta última *totis orbis*. En la primera, independientemente del manejo político y sanitario de muy bajo desempeño, tuvimos que importar de Canadá la vacuna contra el virus y las pruebas clínicas para realizar los diagnósticos, precisamente por falta de políticas de desarrollo científico-tecnológico nacional; el gasto que se erogó por este rubro fue descomunal; la pregunta de banqueta es qué hubiera

© Malú Méndez Lavielle. *Escarlata de Lis*.





© Malú Méndez Lavielle. *Edipo*.

pasado si tan solo el 10 % de este gasto catastrófico se hubiera invertido, tiempo atrás, para su desarrollo; bueno, el “hubiera”... y no aprendimos; la segunda pandemia nos pilló en peores condiciones: la compra de miles de aparatos para respiración asistida y no quiero hacer una lista que está en el “consciente colectivo”, incluidas, por supuesto, las pérdidas humanas. Como señalé en el texto encontrado, ese pensamiento optimista de la necesidad de tener una secretaria de estado encargada de la ciencia y la tecnología se realiza hoy; enhorabuena por eso, pero es el paso cero; hay mucha responsabilidad en su buen desempeño, por supuesto en la cancha de la clase política relacionada, pero también en nosotros, los que trabajamos profesionalmente en la construcción del patrimonio cultural del país, para hacer y dar el contrapeso necesario para lograr un buen desempeño en este ámbito.

B I B L I O G R A F Í A

Martín-Rodríguez JF, Cardoso-Pereira N, Bonifácio V y Barroso y Martín JM (2004). La década del cerebro (1990-2000): algunas aportaciones. *Revista Española de Neuropsicología* 6, 3-4: 131-170.

Peralta y Fabi R (2007). El exilio español y la ciencia mexicana. En: Mayer A (Coord.), *Nostris magistris hispanis ex exsilio provenientius. Homenaje a 70 años de la Guerra Civil Española* (pp. 11-18). Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Históricas (Serie Divulgación 8), México.

Pellicer F (2006). Apuntes sobre el fraude científico. *Elementos* 61:23-29.

Pellicer F (2014). Lo Nobel que quita lo Noble. *Salud Mental* 37(2):95.

Francisco Pellicer Graham
Laboratorio de Neurofisiología Integrativa
Dirección de Neurociencias
Instituto Mexicano de Psiquiatría
Ramón de la Fuente Muñiz
pellicer@inprf.gob.mx

© Malú Méndez Lavielle. Ágata.



El origen de la vida: ¿todo lo que hay que saber?

José Antonio **González Oreja**

Origin of Life es el poco original título de un interesante libro de David W. Deamer publicado en 2020. El autor es un reconocido investigador sobre el origen de la vida, que comenzó su carrera académica en 1967, y que desde 1994 ha estado adscrito a la Universidad de California en Santa Cruz, donde ha desarrollado una importante labor sobre biofísica de membranas y química de vesículas.

En relación con el origen de la vida, David Deamer estuvo entre los primeros en demostrar que se pueden formar vesículas membranosas estables a partir de moléculas más sencillas que los fosfolípidos que hoy día dan forma a las membranas celulares de los seres vivos. Después, Deamer extendió sus estudios a ciertos compuestos anfífilicos¹ hallados en meteoritos carbonáceos, y mostró que también pueden formar vesículas microscópicas (Luisi 2016). Así pues, la obra que ahora reseño se suma a la ya larga lista de libros publicados sobre el tema, como los que aparecen en el Cuadro 1.1 de Luisi (2016), a los que hay que añadir los títulos editados desde entonces (por ejemplo: Aguilera, 2017 o Chatterjee, 2023).

ESTRUCTURA DE LA OBRA

El libro de Deamer (Figura 1) es una obra corta (124 páginas), bien escrita y ricamente ilustrada con una veintena de figuras en blanco y negro y otras tantas láminas a color,

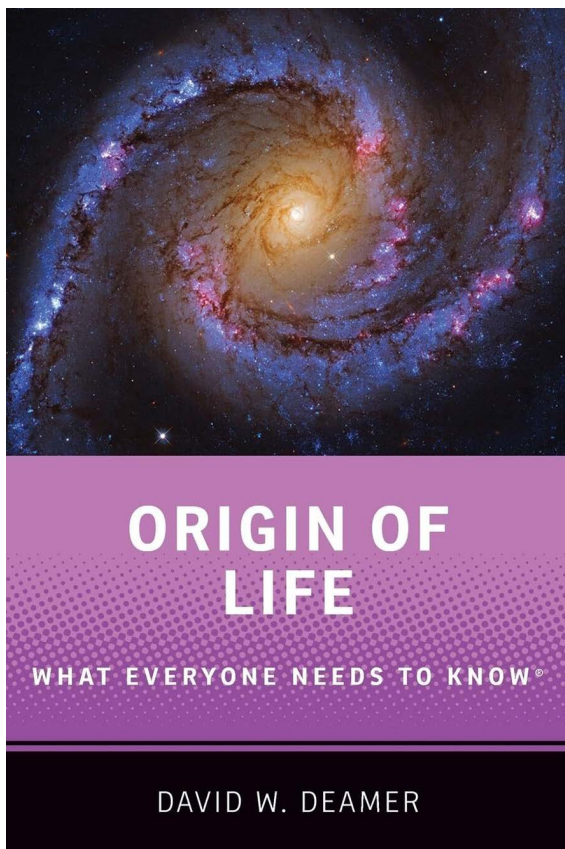


Figura 1. Portada de *Origin of Life*, el libro de Deamer (2020) aquí reseñado.

dispersas por todo el libro. El libro presenta una amplia colección de preguntas relacionadas con el origen de la vida en la Tierra, para las cuales el autor ofrece primero una respuesta y después nos explica cómo lo sabemos.

La primera pregunta es todo un desafío: ¿Por qué íbamos a querer saber (más) sobre el origen de la vida? Sin duda, la respuesta más simple es la que ofrece el propio autor: por simple curiosidad. Y se refiere aquí a la conocida obra de Kauffman (1993), *At Home in the Universe* (es decir, “En Casa en el Universo”), y la profunda satisfacción que nos inunda (al menos, ¡a muchos de nosotros!) cuando empezamos a comprender cómo nuestra vida en la Tierra está conectada con el resto del universo. Una comprensión que está llena de sorpresas y revelaciones. Además, Deamer añade las aplicaciones prácticas que se derivan de algunos

descubrimientos científicos relacionados con el origen de la vida.

La historia del pensamiento científico en relación con el origen de la vida se inicia en 1924 con las ideas de Alexander Oparin, y continúa en 1929 con las reflexiones de J. B. S. Haldane. Ambos llegaron, de forma independiente, a la conclusión de que el origen de la vida puede entenderse en términos químicos, y desde entonces esta idea ha guiado la investigación al respecto. Recientemente, la astrobiología ha enriquecido el panorama y ha ampliado nuestras perspectivas más allá de la Tierra y su biosfera. Hoy día, según Deamer, tenemos una idea razonablemente buena de cómo la Tierra se convirtió en un planeta habitable, y de por qué es probable que la vida esté distribuida por toda la Vía Láctea, con sus miles de millones de estrellas y planetas, algunos de los cuales serán seguramente habitables (*sic*).

Aun así, quedan muchas piezas por encajar en este enorme rompecabezas que es el origen de la vida, y hay muchas maneras de unirlos para que formen una “imagen global” (*a big picture*). Algunas de estas piezas están sólidamente fundadas en conocimientos científicos propios de la química y la física. Otras son suposiciones más o menos razonables sobre las características de la Tierra primitiva, de hace unos 4 Ga.² Y quedan aún algunos grandes huecos en el *puzzle*, justo allí donde los científicos muestran opiniones que a veces resultan radicalmente diferentes. No olvidemos, además, que en relación con el tema que nos ocupa abundan las meras conjeturas (en ocasiones, sin una base científica firme) y escasean los datos robustos (que, en todo caso, son menos abundantes de lo que desearíamos).

Por ejemplo, muchos estarán de acuerdo en que el agua líquida es un requisito esencial para la vida tal y como la conocemos, pero ¿se encontraba inicialmente presente en ambientes ligados a las fumarolas submarinas de los profundos fondos oceánicos, o era más bien una fuente de agua dulce (*freshwater*), asociada a las masas de rocas volcánicas ya emergidas? Estas y otras preguntas relacionadas, muchas todavía sin respuesta, resultan

verdaderamente excitantes para un científico, tanto como para querer dedicar toda una vida a intentar resolverlas. Y aunque nunca vamos a saber con certeza cómo se originó la vida en la Tierra, la investigación al respecto nos ayudará a entender cómo se puede originar la vida en un planeta habitable, como la Tierra primitiva.

A continuación, pasaré revista a algunos de los temas cubiertos en las tres secciones en las que se estructura el libro.

CÓMO ENSAMBLAR UN PLANETA HABITABLE

La primera parte del libro, que presenta conocimientos astrofísicos y astrobiológicos relacionados con la formación de los primeros elementos químicos, el origen de la Tierra y el de los elementos utilizados por la vida, comienza de forma impactante, pues el autor nos ofrece la siguiente definición del elemento químico más sencillo: “El hidrógeno es un gas incoloro e inodoro que, cuando se le da un tiempo suficiente, se transforma en personas. ¿Cuánto tiempo? ¡13.8 mil millones de años!”

En efecto, los átomos de hidrógeno que encontramos en nuestros cuerpos (donde suponen ca. 70 % del número total de átomos, y que como dice Deamer forman parte de nosotros solo porque no han sido atrapados en una estrella) tienen la misma edad que el propio universo, pues se formaron hace unos 13.8 Ga en el *big bang*, el origen del espacio, el tiempo, la materia y la energía. Por su parte, los átomos más pesados que el hidrógeno, como los de carbono, oxígeno o nitrógeno, pero también azufre, fósforo y otros que encontramos en las proteínas, los ácidos nucleicos o las membranas celulares de los seres vivos, también tienen miles de millones de años de antigüedad... pero menos. Pues no se formaron en el *big bang*, sino que fueron sintetizados después a partir del hidrógeno, en un proceso complejo conocido como nucleosíntesis estelar. En esencia, si una estrella que está agotando su combustible estelar tiene una masa menor a unas 10 veces la del sol, termina por convertirse en una enana blanca, que se enfría lentamente. Pero, si la estrella moribunda tiene una masa mayor a unas

10 veces la del sol, entonces se expande primero en una gigante roja y colapsa después, explotando de forma masiva como una supernova y liberando finalmente la mayor parte de su masa en forma de partículas microscópicas que dan lugar al polvo interestelar (véase, por ejemplo, Franknoi y colaboradores, 2022). Estas cenizas de estrellas que murieron tiempo atrás son ricas en diversos compuestos químicos, incluyendo los elementos que forman la Tierra y la vida. Y es que, como dijo Carl Sagan, el reconocido científico y popularizador de la ciencia, estamos hechos de polvo de estrellas. Este polvo interestelar es el origen de los átomos y las moléculas de la vida en el Sistema Solar, y presumiblemente en otros sistemas planetarios.

En el polvo interestelar se han detectado desde moléculas tan simples como el agua (H_2O) hasta otras tan complejas como la glicina (CH_2NH_2COOH), pasando por dióxido de carbono (CO_2), amoníaco (NH_3), formaldehído ($HCHO$), ácido fórmico ($HCOOH$), ácido acético (CH_3COOH), y así a través de una larga lista con más de 100 compuestos. Estos compuestos, y otros todavía más complejos, fueron transportados a través del espacio y se encontraron finalmente en la Tierra en formación, hace unos 4.57 Ga, mientras que otros se sintetizaron después en nuestro planeta por medio de reacciones químicas muy diversas que tuvieron lugar en la atmósfera primitiva, en los océanos y en las masas de tierra emergidas. El lector interesado en saber más sobre nuestras raíces químicas en el cosmos puede consultar el trabajo de Bachiller (2019).

Deamer defiende firmemente que la vida en la Tierra no pudo haberse formado antes de que existiesen grandes océanos de agua líquida; y lo sorprendente es que tales océanos pudieron existir tan pronto como hace 4.4-4.3 Ga, tal y como se deduce de la datación geoquímica con zircones. Nuestro planeta, entonces, presentaba un océano rico en sales, con masas emergidas (islas) de rocas volcánicas, y una atmósfera compuesta principalmente de nitrógeno y pequeñas cantidades de CO_2 . A partir de un estado fundido anterior, la Tierra aún

estaba enfriándose; pero, en cuanto el ciclo del agua fue posible, la precipitación (lluvia) generó pozas de agua dulce en la superficie de aquellas islas volcánicas, pozas que estuvieron sujetas a un ciclo de evaporación (por calor geotérmico) y precipitación (por enfriamiento a temperatura ambiente). Es razonable pensar que la vida, dice Deamer, emergió por primera vez en nuestro planeta en un ambiente similar a este, hace entre 4.2 y 3.8 Ga.

DE (ALGO QUE ESTÁ) NO VIVO A (ALGO QUE ESTÁ) CASI VIVO

La segunda sección del libro comienza también de forma sorprendente. “Si está leyendo este libro esperando saber cómo comenzó la vida”, aclara Deamer, “siento decirle que nadie sabe la respuesta”. A continuación, el autor hace un repaso muy breve de algunas hipótesis (históricas y actuales) propuestas para dar cuenta del origen de la vida, y deja para el final la que él mismo defiende (véase más abajo). En este recorrido aparecen reflejadas la panspermia (por ejemplo, González Oreja, 2016), los coacervados de Oparin, o el famoso experimento de Stanley Miller bajo la dirección de Harold Urey, ideas con las que todos los biólogos y estudiantes de biología estamos familiarizados. Aparecen, también, la hipótesis de Graham Cairns-Smith en relación con la actividad catalítica de las superficies de minerales arcillosos, o la de Günter Wächtershauser acerca de minerales ferrosos; el así llamado Mundo de Hierro y Azufre; y otros modelos, como el del Metabolismo Primero, o el Mundo de los Lípidos, o el Mundo del ARN.

Después de su resumen de hipótesis previas, Deamer incluye las ideas de Charles Darwin respecto al origen de la vida. En una conocida carta fechada en 1871 a su amigo el botánico y explorador Joseph Hooker, Darwin garrapateó unas pocas frases que han vuelto a ser relevantes siglo y medio después, pues en ellas contempló la posibilidad de que la vida se hubiera originado, *de novo*, en una poza cálida y somera en la superficie de la Tierra primitiva:

It is often said that all conditions for the first production of a living organism are now present, which could ever have been present. But if (& oh what a big if) we could conceive in some warm little pond with all sorts of ammonia & phosphoric salts, -light, heat, electricity &c present, that a protein compound was chemically formed, ready to undergo still more complex changes, at the present day such matter would be instantly devoured, or absorbed, which would not have been the case before living creatures were formed.³

En gran medida, la investigación del propio Deamer se ha centrado en poner a prueba la idea de Darwin.

Para Deamer, el agua dulce de las fuentes y pozas termales existentes en las zonas volcánicas ya emergidas de la Tierra primitiva pudo tener propiedades físicas y químicas que hicieron más fácil el origen de la vida. La lógica detrás de esta idea es fácil de entender, observando lo que ocurre en un paisaje volcánico incluso hoy día, donde las pozas de aguas termales (como aquel *warm little pond* de Darwin) se secan y se inundan repetidamente, en ciclos de evaporación y rellenado. En experimentos de laboratorio se ha observado que estos ciclos de deshidratación y rehidratación concentran diferentes especies químicas (que actúan como potenciales reactivos, formando películas y geles sobre superficies minerales). A la vez, dichos ciclos húmedo-seco-húmedo suponen la fuente de energía necesaria para sintetizar las macromoléculas esenciales para la vida (biopolímeros, como proteínas y ácidos nucleicos), mediante reacciones de condensación a partir de sus constituyentes químicos más sencillos (monómeros, como carbohidratos, aminoácidos y nucleótidos). Además, dice Deamer, si están presentes ciertas moléculas simples con propiedades anfífilas (como algunos ácidos grasos), que pueden autoensamblarse en forma de vesículas, entonces los polímeros pueden quedar encapsulados en estos compartimentos microscópicos rodeados por membranas. Estas estructuras reciben el nombre de protocélulas. Las protocélulas no están vivas, pero tienen la capacidad de atravesar procesos de selección y evolución química hacia la vida.

Según Deamer, los experimentos naturales que desembocaron en el origen de la vida nunca habrían tenido lugar en el inmenso océano primitivo a no ser que se pudieran mantener juntas, en un mismo lugar, mezclas complejas de varios compuestos solubles en agua. Entre otras razones, porque su concentración en el medio acuoso del océano primigenio habría sido tan baja como para hacer imposibles las reacciones químicas necesarias. Por otro lado, incluso disoluciones muy diluidas pueden alcanzar concentraciones extremadamente altas cuando se evapora el agua dulce de las fuentes termales superficiales en islas volcánicas.

En resumen, la idea de Deamer es que, probablemente, la vida se originó en los ambientes hidrotermales superficiales de origen volcánico, donde se encontraban los ingredientes necesarios para originar la vida, así como las condiciones de ciclos húmedos y secos que facilitaron su interacción química y la selección natural. Una idea controvertida, como reconoce el propio Deamer, pero que solventa algunas de las críticas de otras hipótesis y modelos explicativos del origen de la vida en la Tierra (véase también el trabajo de Van Kranendonk y colaboradores 2019, y referencias ahí citadas).

LO QUE NOS QUEDA POR DESCUBRIR

Antes de que podamos comprender bien el origen de la vida en un planeta estéril pero habitable como la Tierra primitiva, es necesario llenar (siquiera parcialmente) una serie de lagunas en nuestro conocimiento. Y la tercera parte del libro de Deamer recopila algunas de las muchas preguntas que existen hoy día en relación con el origen de la vida, preguntas que podrían llenar las carreras científicas de muchos investigadores jóvenes. Por ejemplo: ¿Cuál fue la fuente de energía utilizada y cuál el origen de los monómeros necesarios para sintetizar las macromoléculas informacionales de la vida, como las proteínas y los ácidos nucleicos? ¿El así llamado Mundo del ARN es real, o solo una conjetura? ¿Cómo se incorporó la información genética a los ácidos nucleicos y cómo

las proteínas se hicieron finalmente con la función catalítica de las enzimas? ¿Mediante qué procesos evolutivos emergió un ribosoma primitivo? ¿Cómo se estableció el código genético mediante el cual una secuencia de bases del ADN se traduce finalmente en una secuencia de aminoácidos? ¿Cómo se incorporó el metabolismo (es decir, la compleja red de reacciones catalizadas por enzimas que transforman moléculas orgánicas en los productos necesarios para mantener la vida) a las primeras formas vivas a partir de mezclas caóticas de los compuestos y las formas de energía existentes en la Tierra prebiótica? ¿Cómo se desarrollaron los intrincados bucles de retroalimentación y control que permitieron la integración funcional de sistemas de polímeros en un nivel superior? ¿De dónde vienen los virus? O ¿qué es LUCA, el “Último Ancestro Común Universal”?

IMPLICACIONES DE LA HIPÓTESIS DE DEAMER

Por supuesto, no sabemos cómo se originó la vida en la Tierra, y es más que probable que esta sea una de esas preguntas para las que la ciencia nunca encuentre una respuesta. Lo cierto es que no toda la comunidad científica está de acuerdo con el modelo explicativo de Deamer que he resumido más arriba. Es decir, no todos aceptan la hipótesis de que las fuentes termales en superficies emergidas fueron los lugares en donde se originó la vida en nuestro planeta. Como señalan Van Kranendonk y colaboradores (2019), la hipótesis del Mundo de Hierro y Azufre ligado a las chimeneas hidrotermales submarinas de los grandes fondos oceánicos sigue “viva y coleando”.

Como quiera que sea, ambas hipótesis tienen implicaciones que van más allá de guiar las futuras investigaciones sobre el origen de la vida en nuestro propio planeta. En la búsqueda de vida en otros mundos, un modelo oceánico sobre el origen de la vida (como el del Mundo de Hierro y Azufre) podría orientar nuestra investigación astrobiológica hacia ambientes distintos a los que nos llevaría un

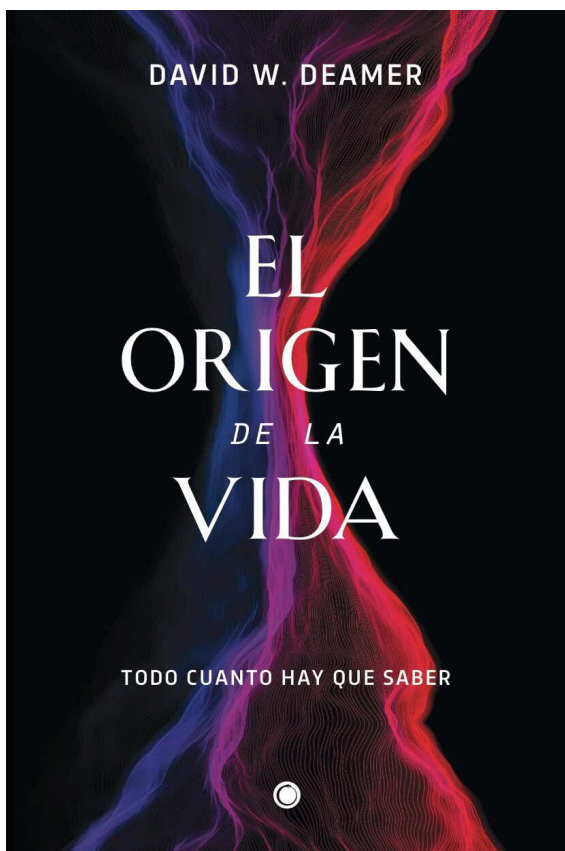


Figura 2. Portada de la traducción al español del libro de Deamer (2020).

modelo terrestre (es decir, en superficies emergidas, como el modelo de Deamer).

En el primer caso, los océanos congelados de Europa y Encélado, satélites de Júpiter y Saturno respectivamente, podrían verse como ambientes adecuados a nuestra exploración. Pero, en el segundo caso, resultaría menos probable que esos mismos ambientes albergasen vida. O, en relación con la posibilidad de vida en Marte, si el origen de la vida estuviera ligado a las chimeneas hidrotermales submarinas, entonces sería más improbable que hubiera podido emerger la vida en el Planeta Rojo. Mientras que, si el origen de la vida en la Tierra estuviera en las pozas termales de las masas emergidas, entonces parecería más probable que también se hubiera originado vida en Marte, ya que este planeta contó hace miles de millones de años con un extendido vulcanismo y agua líquida (Van Kranendonk y colaboradores 2019).

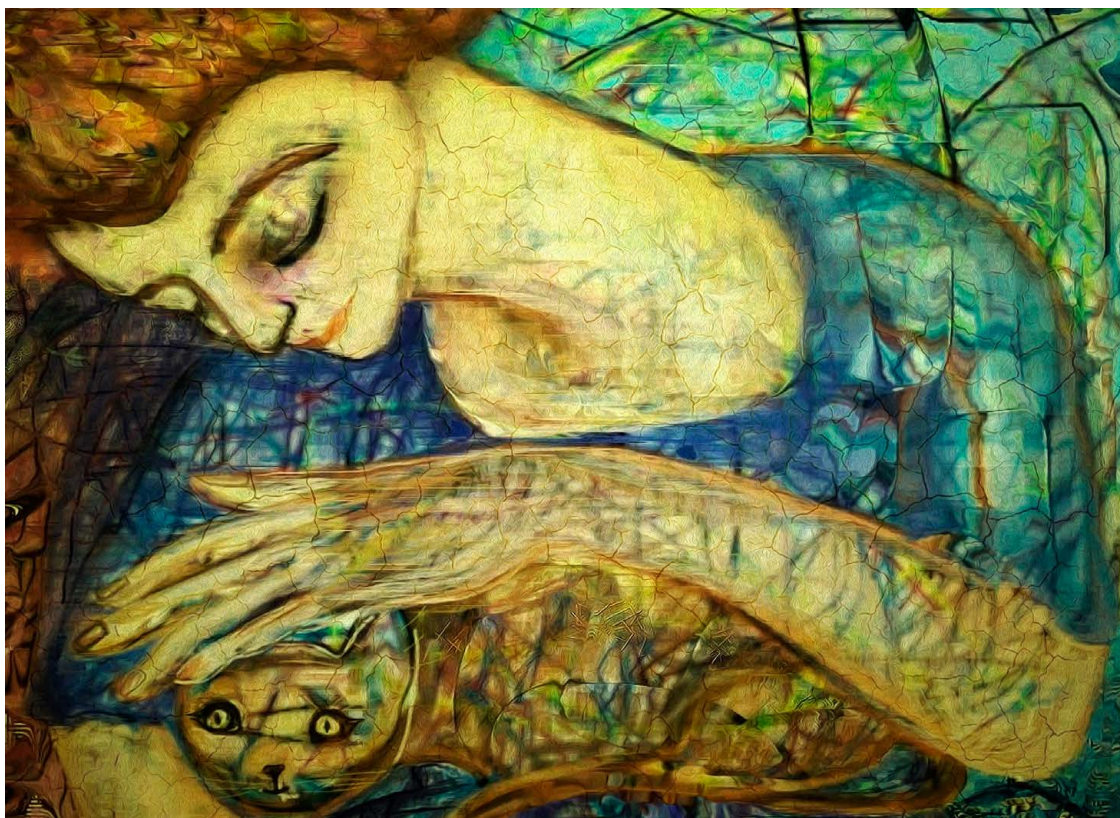
¿TODO LO QUE HAY QUE SABER?

El libro de Deamer que aquí reseño forma parte de una importante colección editada por la Oxford University Press (OUP) que incluye más de 100 títulos escritos por autoridades en la materia correspondiente, sobre temas actuales de lo más diversos y en muchos casos complejos (como el ateísmo, la inteligencia artificial, el cambio climático, la evolución o las pandemias), y que se presentan al público lector en un mismo formato (de preguntas y respuestas). Se trata de la colección *What Everyone Needs to Know*, que podemos traducir como “Lo que todos tienen que saber”.

Sin embargo, la traducción de la obra de Deamer a nuestro idioma apareció en 2022 con el subtítulo “Todo cuanto hay que saber” (Figura 2). No es lo mismo. El libro de Deamer no nos muestra todo lo que hay que saber sobre el origen de la vida; de hecho, no es este el espíritu de la colección, cuyos títulos ofrecen al lector “los conocimientos básicos” (*sic*) necesarios para poder participar en una conversación al respecto (por ejemplo, búsquese *What Everyone Needs to Know* en la página web de la OUP, <https://corp.oup.com/>).

Pero es que, además, el libro de Deamer no es un libro imparcial, como reconoce el propio autor. Más arriba hemos visto, aunque muy someramente, que hay muchas aproximaciones e hipótesis sobre el origen de la vida en la Tierra. Pues bien, como observa Deamer en su libro, estas ideas están siendo “evaluadas por un jurado” de científicos expertos en la materia, en función de la capacidad explicativa y el peso de la evidencia a favor o en contra de cada una de ellas. Y Deamer es un miembro de tal “jurado”, aunque no un miembro imparcial, pues obviamente defiende su propio modelo explicativo. Así pues, difícilmente puede ser su libro “todo cuanto hay que saber”.

En realidad, la literatura disponible sobre el tema es muy amplia, tanto en inglés como en español, y permite que el lector que quiera saber más pueda saciar fácilmente su curiosidad. Aunque el libro de Deamer no sea “todo cuanto hay que saber”, sería de desear que estuviera entre “lo que todos tienen que saber”.



© Malú Méndez Lavielle. Consolation.

NOTAS

¹ Los compuestos anfífilos, del griego *anfi* (ambos) y *philos* (amigo o amante), son moléculas que presentan una parte con mayor afinidad por la molécula del agua (es decir, hidrofílica), y otra parte afín a las moléculas grasas (lipofílica). Este carácter anfílico en una misma molécula permite entender su importante función en relación con el autoensamblaje de estructuras membranosas.

² Ga, por *giga annum*, es la abreviatura de una unidad de tiempo muy utilizada en astronomía, geología y estudios sobre el origen de la vida, para hacer referencia a períodos de tiempo muy grandes que de otro modo serían más difíciles de expresar y comprender. Un gigaaño (que equivale al billón de años de la literatura en inglés) es igual a mil millones de años: 1 Ga = 1,000,000,000 de años.

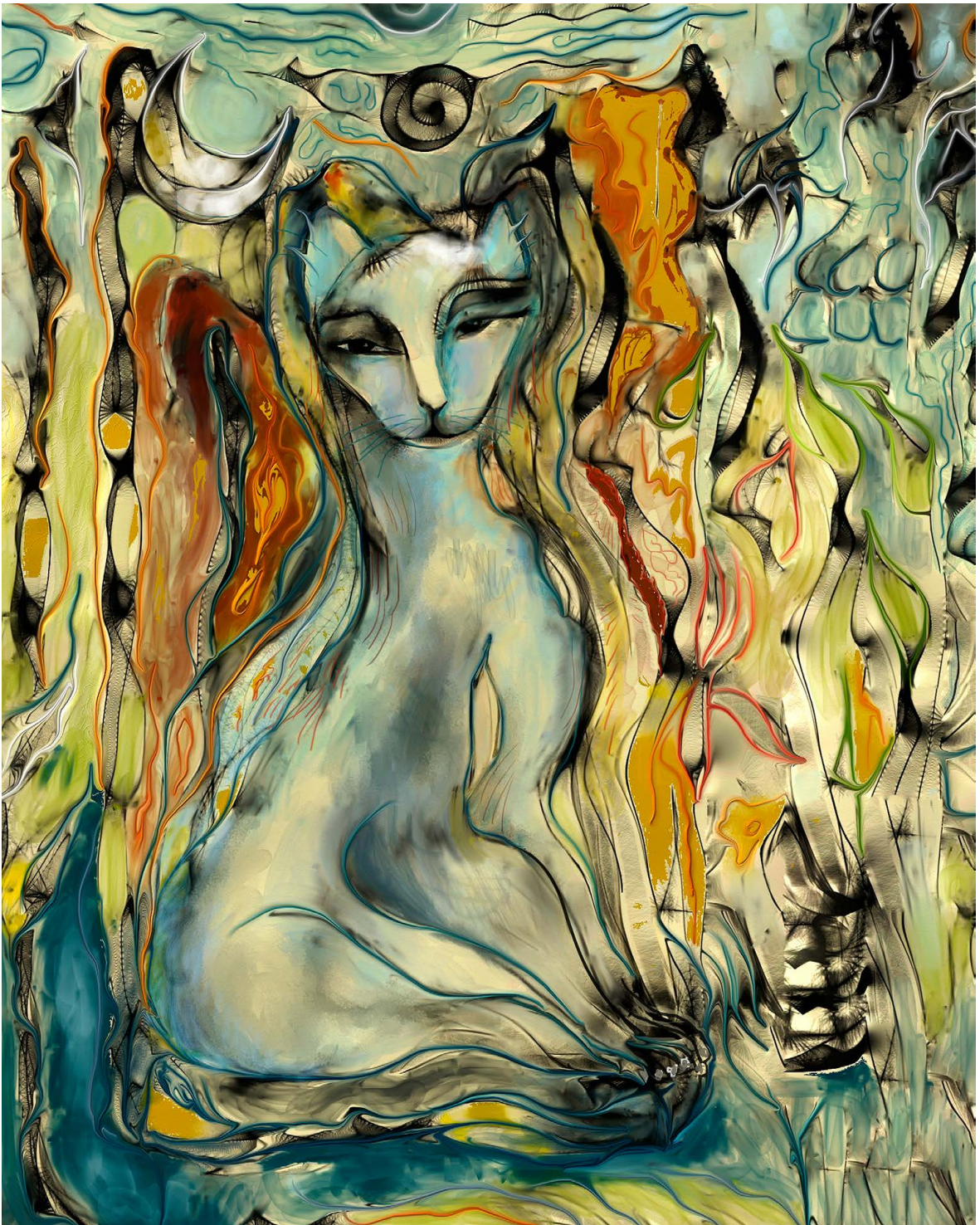
³ “Se suele decir que todas las condiciones para la primera producción de un organismo vivo están presentes ahora, y que siempre pudieron haber estado presentes. Pero si (¡y vaya si es un gran “si”!) pudiéramos concebir que en algún charquito cálido, con toda clase de sales de amoníaco y fosfóricas, luz, calor, electricidad, etc., presentes, se hubiera formado químicamente un compuesto proteico, listo para experimentar cambios aún más complejos... en la actualidad, esa materia sería devorada o absorbida al instante, cosa que no habría sucedido antes de que se formaran los seres vivos.” (Traducción del editor.)

REFERENCIAS

- Aguilera JA (2017) *El Origen de la Vida. La Aparición de los Primeros Microorganismos*. Barcelona: RBA.
- Bachiller R (2019) El origen astroquímico de los sistemas planetarios y la vida. *TEMAS Monográficos de Investigación y Ciencia* 96:11-19.
- Chatterjee S (2023) *From Stardust to First Cells. The Origin and Evolution of Early Life*. Cham: Springer.
- Deamer DW (2020) *Origin of Life. What Everyone Needs to Know*. New York: Oxford University Press.
- Franknoi A, Morrison D and Wolff SC (2022) *Astronomy 2e*. Houston: OpenStax.
- González Oreja JA (2016) Quo vadis, panspermia? Del origen de la vida en la Tierra a una ecología interplanetaria. *eVolución, Revista de la Sociedad Española de Biología Evolutiva* 11(1): 71-88.
- Kauffman S (1995) *At Home in the Universe. The Search for Laws of Self-Organization and Complexity*. Oxford: Oxford University Press.
- Luisi PL (2016) *The Emergence of Life. From Chemical Origins to Synthetic Biology*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Van Kranendonk MJ, Deamer DW and Djokic T (2019) Fuentes de vida. *TEMAS Monográficos de Investigación y Ciencia* 96:44-51.

José Antonio González Oreja
Facultad de Ciencias Biológicas
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
jgonzorj@hotmail.com

© Malú Méndez Lavielle. *Reverberación.*



Dr. Strangelove o cómo aprendimos a amar la bomba: ciencia, poder y paranoia

Alberto **Vázquez Salazar**

En 2025 se cumplieron ochenta años de Hiroshima y Nagasaki. Desde entonces, la ciencia dejó de habitar una torre de marfil y se convirtió en infraestructura de poder, diplomacia y propaganda. Este ensayo propone que, en ese tránsito, aprendimos a vivir con la amenaza nuclear hasta volverla familiar, incluso risible, y que esa normalización solo se entiende si se siguen a la vez las trayectorias de la ciencia, la política, la gestión del riesgo y la cultura.

Para mostrarlo, tomo la película *Dr. Strangelove* (1964) como hilo conductor y leo sus escenas como condensación satírica de debates sobre regulación, disuasión y responsabilidad científica, mientras que los episodios históricos funcionan como contexto para entender de qué experiencia social se alimenta la comedia negra de Stanley Kubrick. En este recorrido, del laboratorio a la sala de decisiones, del seguimiento sanitario de los sobrevivientes a los informes públicos sobre riesgos, de la promesa de “átomos para la paz” a la sala de guerra imaginada por Kubrick, interesa ver cómo los datos, sus interpretaciones y sus relatos moldearon miedos, políticas y hasta nuestro humor negro ante la posibilidad del fin del mundo.

DEL LABORATORIO AL ESTADO CIENTÍFICO

Las explosiones de agosto de 1945 consolidaron una nueva relación entre ciencia y gobierno. La Ley de Energía Atómica de 1946 creó la Comisión de Energía Atómica de Estados Unidos y trasladó a la esfera civil la gestión del átomo, con presupuestos estables, burocracias especializadas y prioridades de investigación definidas desde el poder público. El “éxito” del Proyecto Manhattan legitimó mantener en tiempos de paz la organización y el ritmo de trabajo de guerra; la domesticación del átomo funcionó como emblema político y administrativo (Forman, 2001). Este complejo institucional no solo hizo posibles bombas más potentes o reactores más eficientes, también creó la figura del experto que en *Dr. Strangelove* aparece sentado en torno a la mesa de guerra, responsable de traducir ecuaciones en decisiones de vida o muerte.

A comienzos de los años cincuenta, la Guerra de Corea expandió los programas federales de investigación y desarrollo. Tras el *Sputnik*, la industria se integró de lleno a esa economía del conocimiento y se multiplicaron los doctorados en ingeniería, física y matemáticas; las universidades se convirtieron en la cantera de una tecnociencia articulada con la seguridad nacional (Forman, 2001). Con el término economía del conocimiento me refiero aquí a un arreglo en el que la inversión en investigación se justifica como motor de crecimiento económico, prestigio internacional y seguridad, de modo que producir ciencia se vuelve una forma de hacer política. El financiamiento estatal y militar impuso prioridades, procedimientos de reporte y reglas de difusión, además de incentivar una competencia por patronazgo que burocratizó la investigación. Este entramado no solo financió ciencia, también la reorganizó (Forman, 2001).

El puente entre física y biomedicina fue decisivo. Técnicas, instrumentos y lenguajes nacidos en la física de guerra y posguerra alimentaron la biología molecular emergente, desde la biofísica de mediados de siglo hasta el estudio del ADN, las proteínas y las cápsidas virales, un giro documentado por la historia

intelectual y de laboratorios de la época (Rasmussen, 1997). En la práctica esto significó que detectores, contadores y modelos de dosis desarrollados para la física militar se aplicaron a tejidos, células y cromosomas humanos, lo que desplazó la atención desde los síntomas visibles hacia las alteraciones microscópicas. Al mismo tiempo, la idea de que lo biológico podía calcularse con el mismo lenguaje probabilístico que guiaba la ingeniería de bombas preparó el terreno para vincular la discusión sobre riesgo sanitario con la lógica estratégica de la Guerra Fría.

MEDIR EL DAÑO, CONTAR LA HERENCIA

Muy pronto se formuló la pregunta sobre las consecuencias sanitarias de las bombas. La Comisión para las Secuelas de la Bomba Atómica, y desde 1975 su sucesora binacional, la Fundación para la Investigación de los Efectos de la Radiación, siguieron durante décadas la salud de los sobrevivientes y de sus hijos. Los primeros resultados, reportados en 1956, no fueron estadísticamente significativos, principalmente porque las condiciones de investigación fueron inéditas y difíciles: hubo diseño de cohortes sin precedentes, problemas de muestreo y comparabilidad temporal, así como fricciones culturales que afectaron la homogeneidad de los datos. A ello se sumó un desplazamiento en el uso del concepto de “mutación”, que dejó de referirse solo a cambios heredables en el material genético y pasó a incluir rasgos morfológicos de difícil comparación, con el consiguiente sesgo en la selección de indicadores (Lindee, 1992). Estas dificultades metodológicas no implicaban que la radiación fuese inocua, sino que hacían muy complejo aislar su efecto en un escenario atravesado por pobreza, enfermedades previas y cambios rápidos en la atención médica. Precisamente por esa ambigüedad, los mismos números podían leerse como prueba de seguridad relativa o como advertencia de que el daño no estaba bien caracterizado, de modo que el informe de 1956 se convirtió en un insumo para argumentos encontrados sobre el riesgo. En la esfera pública, distintos actores utilizaron fragmentos de esos resultados para moderar o amplificar la

QUÉ FUE LA COMISIÓN PARA LAS SECUELAS DE LA BOMBA ATÓMICA

Creada tras la guerra, coordinó estudios clínicos y epidemiológicos en Hiroshima y Nagasaki, incluyendo cohortes de personas nacidas después de 1945. En 1975 se reorganizó como fundación binacional con dirección compartida entre Japón y Estados Unidos, asegurando continuidad de las cohortes y de los protocolos de seguimiento. Con el tiempo, las bases de datos de esta comisión se volvieron referencia para organismos internacionales encargados de fijar límites de exposición y recomendaciones de protección radiológica.

QUÉ DIJO EL INFORME AL PÚBLICO EN 1956

El resumen para la ciudadanía sintetizó hallazgos sobre genética, patología y física de radiaciones, y emitió recomendaciones prudentes. Para la historia de la regulación, su difusión en prensa y medios fue tan importante como el contenido técnico de los capítulos completos (Hamblin, 2007). Al presentar en pocas páginas lo que en el informe completo ocupaba cientos, el documento popular mostró hasta qué punto el problema del riesgo radiológico dependía de cómo se seleccionaban y narraban los datos para públicos no especialistas.

ansiedad social por la radiación, en un contexto de pruebas nucleares, protestas pacifistas y preocupación internacional por la lluvia radiactiva.

En paralelo, experimentos con animales en el Reino Unido enfrentaron limitaciones de espacio, personal y diseño, que derivaron en conclusiones igualmente ambiguas. Los trabajos en ratones y otros animales buscaban justamente suplir las lagunas de la evidencia humana, al permitir controlar dosis, tiempos y condiciones ambientales, pero las carencias de infraestructura y la duración limitada de los proyectos hicieron que las curvas de mortalidad y mutación obtenidas fueran también difíciles de extrapolar a poblaciones humanas. La coexistencia de estudios en personas expuestas y en animales de laboratorio muestra cómo la misma tecnociencia que producía la bomba se esforzaba por medir sus consecuencias biológicas, con resultados que alimentaban tanto la prudencia regulatoria como la tentación de minimizar el peligro. El saldo de mediados de siglo fue una sensación de incertidumbre metodológica que convivía con el deseo social de certezas.

RIESGO Y RELATO, 1956

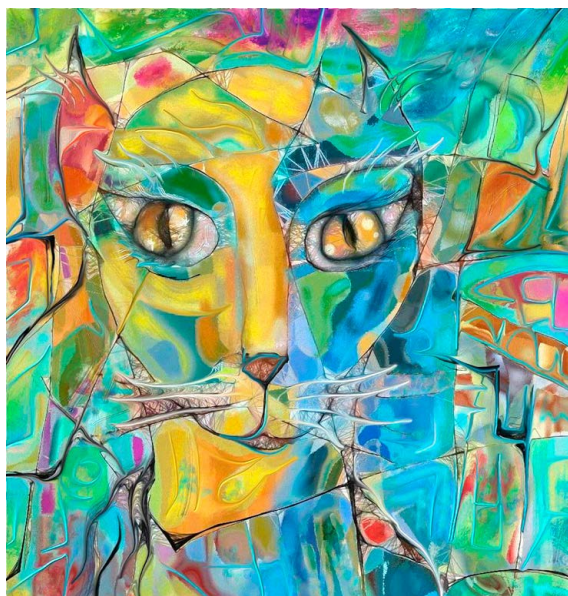
En 1956, la Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos difundió al gran público su informe sobre los efectos biológicos de la radiación. El panel de Genética popularizó la idea de que toda dosis conlleva

riesgo, lo que instaló en el debate social el modelo lineal sin umbral para el daño hereditario. Más allá de la discusión historiográfica posterior sobre su gestación y del hecho de que su difusión no fue homogénea en todos los países, buena parte de los estudios coincide en que tuvo un efecto comunicativo importante, pues ayudó a fijar un lenguaje regulatorio y una sensibilidad pública frente a la exposición, aunque otras investigaciones han matizado el alcance de ese impacto (Hamblin, 2007). En términos conceptuales, el modelo de riesgo sin umbral conectaba la biología molecular emergente con la administración del peligro, al traducir el daño potencial en cifras que podían insertarse en reglamentos y acuerdos diplomáticos.

DISUASIÓN Y ABSURDO,

DE LOS PLANES INTEGRADOS A KUBRICK

La estrategia militar de la Guerra Fría reorganizó la técnica y la imaginación política. A comienzos de los sesenta se consolidó un plan nuclear integrado con listas extensas de blancos y protocolos detallados; entre 1961 y 1968, la Operación Chrome Dome mantuvo bombarderos estratégicos en alerta aérea continua sobre rutas del Ártico y el Mediterráneo. El B-52, con cargas termonucleares del orden de megatones y blancos asignados,



© Malú Méndez Lavielle. Cuzam.

cristalizó la doctrina de la disuasión (Rosenberg, 1983). La misma racionalidad cuantitativa que servía para estimar dosis y probabilidades de cáncer se aplicó aquí para calcular escenarios de primer golpe y represalia, lo que unió de manera inquietante el lenguaje del riesgo sanitario con el vocabulario de la seguridad nacional.

Ese trasfondo permite entender por qué, en 1964, Stanley Kubrick eligió la sátira para hablar del riesgo nuclear. El propio proyecto nació como un drama y derivó en comedia negra cuando el director advirtió que la lógica de la Guerra Fría, sus protocolos, sus automatismos y su fe en la racionalidad estratégica, rozaba ya lo absurdo. La película abre con una coreografía de reabastecimiento en vuelo: dos aviones acoplados en el aire, una imagen de precisión técnica que Kubrick convierte en metáfora casi íntima de una maquinaria bélica que se pretende aséptica, eficiente y, por eso mismo, inquietante. Al elegir la risa y no el sermón, Kubrick convirtió en experiencia estética una angustia compartida por millones de personas expuestas a boletines de defensa civil, simulacros escolares y noticias sobre nuevas armas.

El célebre “cuarto de guerra” condensa esa moral a distancia: una mesa redonda, pantallas, mapas

y voces que apuestan el destino del planeta como si se tratara de una partida de cartas. Allí conviven el cálculo y la fanfarronería, la jerga técnica y la testosterona. La única presencia femenina aparece fuera de la toma de decisiones, una modelo en una revista, guiño crítico al sesgo de género de la época. La paranoia anticomunista se encarna en el general Jack D. Ripper, cuyo delirio sobre la “contaminación” de los fluidos corporales empuja la trama hacia el abismo, recordándonos que los sistemas complejos, por robustos que parezcan, son vulnerables a la sinrazón de individuos investidos de autoridad. Esa puesta en escena resume la fe de la cultura política de la época en que un pequeño grupo de varones expertos, al margen de la ciudadanía, podía administrar un peligro planetario mediante procedimientos cada vez más complejos.

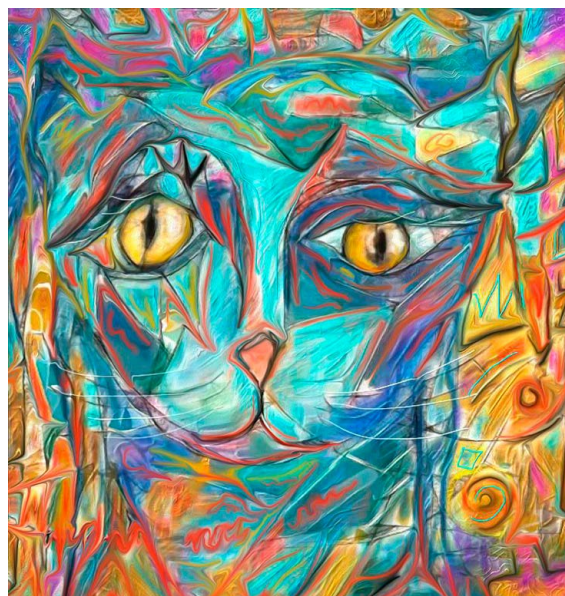
El mayor Kong, que cabalga la bomba como un jinete temerario, simboliza la mezcla de bravura, ingenuidad y fatalismo de una época que confió la paz a la amenaza del exterminio. La “máquina del Juicio Final” que destruye todo si alguien ataca primero no es un capricho de guion, sino la caricatura lógica de un mundo que automatizó el apocalipsis para volverlo “razonable”. El consejero científico con pasado nazi añade otra capa incómoda: la tecnología y el saber experto no son neutros, pueden impulsar bienestar o servir a la dominación, según quién los dirija y bajo qué reglas se apliquen. Kubrick sugiere que incluso un presidente sensato puede quedar arrinconado por la inercia de la burocracia militar y la obediencia a procedimientos que, una vez activados, ya no obedecen a nadie. El júbilo del jinete al borde del impacto convierte en gesto físico lo que el subtítulo de la película formula en palabras: aprender a dejar de preocuparse y amar la bomba, es decir, aceptar que el equilibrio del mundo descansa en artefactos imposibles de controlar por completo. En esta clave, *Dr. Strangelove* puede leerse como comentario sarcástico sobre la alianza entre tecnociencia, burocracia militar y cultura de la disuasión, alianza que enmarcaba tanto los estudios epidemiológicos como los programas de átomos para la paz.

La sátira dialoga con el clima cultural de la época, que idealizaba la armonía política y económica y exageraba la amenaza comunista como cemento social. No extraña que el estreno previsto a finales de 1963 se pospusiera tras el asesinato del presidente Kennedy, intensificando la lectura pública de la película como comentario sobre un mundo al borde. En México se conoció como *Dr. Insólito o: Cómo aprendí a dejar de preocuparme y amar la bomba*; su título original, *Dr. Strangelove, or How I Learned to Stop Worrying and Love the Bomb*, captura con ironía la normalización del absurdo: aprender a “dejar de preocuparse” a fuerza de convivir con lo impensable. La recepción fue diversa y la historiografía ha discutido hasta qué punto influyó realmente en la percepción pública del riesgo nuclear, pero su perdurabilidad como referencia cultural indica que logró cristalizar de manera especialmente eficaz los miedos y contradicciones de ese momento. En este ensayo uso esa fórmula como atajo para nombrar un proceso más amplio: la naturalización colectiva de un peligro que se vuelve parte del paisaje gracias a una combinación de expertos, instituciones y relatos.

DIPLOMACIA DEL ÁTOMO, CONTROL Y COOPERACIÓN

Si la disuasión exigía secreto, la paz exigía relato. En 1953, el presidente Dwight D. Eisenhower presentó ante la ONU la idea de “Átomos para la paz”, una promesa de encauzar la energía nuclear hacia fines médicos, agrícolas y energéticos que preparó el terreno para un organismo internacional, para estándares técnicos y para marcos de supervisión. En el ámbito interno, el programa de radioisótopos transformó un recurso de guerra en insumo civil; desde 1946, el reactor de grafito de Oak Ridge produjo isótopos para hospitales y laboratorios, y a partir de 1947 la comisión atómica asumió su distribución con criterios administrativos y de control. El programa asumía que ofrecer beneficios visibles, como tratamientos contra el cáncer o nuevas fuentes de energía, ayudaría a legitimar una tecnología cuyo origen bélico y cuyo riesgo radiológico seguían siendo motivo de alarma.

La reanudación de exportaciones vino acompañada de cláusulas estrictas, inspecciones del



© Malú Méndez Lavielle. *Narciso*.

avance, supervisión de publicaciones y límites de uso. La circulación del material funcionó como diplomacia científica y como dispositivo de estandarización y vigilancia internacional. La distribución abarcó Europa, Sudáfrica, Australia, Canadá y América del Sur. Con el paso de los años, el énfasis pasó de vender isótopos a exportar la tecnología que los producía, preservando marcos de control bajo un discurso de cooperación. En biomedicina, los radioisótopos consolidaron diagnósticos y terapias, mientras que en ecología permitieron rastrear flujos energéticos y ciclos biogeoquímicos, impulsando la ecología de sistemas, un panorama ampliamente documentado por la historia de la ciencia y la medicina nucleares (Creager, 2013). Así, la circulación controlada de materiales y saberes nucleares combinó cooperación científica y vigilancia política, y contribuyó a consolidar la idea de que el riesgo del átomo podía manejarse mediante estándares técnicos, inspecciones y acuerdos internacionales. Ese optimismo regulatorio contrasta con el pesimismo de *Dr. Strangelove*, donde cualquier protocolo puede ser sabotado, pero ambas caras forman parte del mismo momento histórico.



© Malú Méndez Lavielle. *Gitana*.

CODA, OCHENTA AÑOS DESPUÉS

La lección de 1945 sigue vigente. La ciencia no es neutra, tampoco es omnipotente. Sus datos requieren contexto, sus inferencias necesitan un marco y sus aplicaciones, una ética. La historia del átomo moderno muestra que las instituciones y los relatos importan tanto como las mediciones. Pensar con Kurbrik no es renunciar a la evidencia, es recordar que la racionalidad sin prudencia puede terminar riéndose de sí misma. Si aprendimos a amar la bomba no fue porque la consideráramos deseable, sino porque nos acostumbramos a convivir con ella como parte inevitable del orden internacional, confiando en regulaciones, tratados y cálculos estratégicos que prometían mantenerla a raya. Ochenta años después, vale la pena preguntarnos si esa confianza sigue justificada y qué papel queremos que desempeñen la ciencia, la política y la cultura al enfrentarnos a riesgos que, como el nuclear, no admiten ensayo general.

R E F E R E N C I A S

- Creager ANH (2013). *Life Atomic: A History of Radioisotopes in Science and Medicine*. University of Chicago Press.
- Forman P (2001) Behind quantum electronics: National security as basis for physical research in the United States, 1940-1960. En: Galison P, Gordin M. y Kaiser D. (Eds.) *Science and society. The history of modern physical science in the Twentieth Century. Volume 3: Physical science and the language of war*. Routledge, New York.
- Hamblin JD (2007) "A dispassionate and objective effort:" Negotiating the first study on the biological effects of atomic radiation. *Journal of the History of Biology* 40:147-177.
- Lindee MS (1992) What is a mutation? Identifying heritable change in the offspring of survivors at Hiroshima and Nagasaki. *Journal of the History of Biology* 25(2):231-255.
- Rasmussen N (1997) Midcentury biophysics: Hiroshima and the origins of molecular biology. *History of Science* 35:244-293.
- Rosenberg DA (1983). The origins of overkill: nuclear weapons and american strategy, 1945-1960. *International Security* 7(4):3-71.

Alberto Vázquez Salazar
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados
Instituto Politécnico Nacional
alberto.vazquez@cinvestav.mx

Equinoccio

Obra gráfica de Malú Méndez Lavielle



© Malú Méndez Lavielle. *Olivia*.

Malú Méndez Lavielle (Ciudad de México) es una artista que durante medio siglo años ha pintado y tocado el piano básicamente para su paz espiritual y su deleite. En los años ochenta estudia arte en Barcelona y de regreso a México ingresa al Conservatorio de Xalapa en donde estudia piano y flauta transversa; posteriormente hace estudios de pintura en la Escuela de Artes Plásticas de la Universidad Veracruzana, así como en la UVyD de la Ciudad de México en 1986.

Sus óleos –y en los últimos 25 años sus pinturas digitales– están hoy en países como Reino Unido, Francia, Suecia, Alemania, Estados Unidos, Guatemala, Chile y en los estados mexicanos de Chihuahua, Tlaxcala, Estado de México, Morelos, Veracruz, Quintana Roo y desde luego Puebla, en donde reside desde 1991. Ha participado en diversas exposiciones entre las que destaca la del Pasaje del Ayuntamiento de Puebla en el año 2000, cuando expuso 35 óleos de familias y paisajes puntillistas con gran aceptación.

Con la llegada de la computación a su vida, Malú comenzó una profunda y sostenida incursión en los soportes digitales mediante *software* como Paint, Photoshop, Corel Painter, Photopaint, Artrage, Sketcher Pro, Sketch Guru y Snapseed, entre otros, que frecuentemente combina en una misma obra; con esos recursos ha realizado unos 700 cuadros que quizás serían considerados neobarrocos por los especialistas, como gustan clasificar las novedades digitales, pero que en todo caso someten al espectador a un mundo cromático fragmentado y muy personal en el que las tonalidades y sus sinuosas formas no son ajenas a las notas musicales de las partituras que interpreta; un mundo interior habitado por mujeres solas, en pareja o en grupos, en colores corrosivos, marinos o celestes, la mayor parte de las veces en habitaciones onduladas de puertas y ventanas cerradas en un íntimo claustro de abundante melancolía como lo reflejan las miradas tristes, pensativas, taciturnas, retadoras o solitarias de sus personajes.

Equinoccio es la segunda incursión de Malú en la revista *Elementos*, luego de haber ilustrado el número 112 (octubre-diciembre de 2018). Ahora

la emprende con un personaje inamovible de su vida, los gatos, que inadvertidamente comenzaron a aparecer en sus pinturas con una asiduidad protagónica que merecía ya el señalamiento; gatos falaces, inconformes, consentidos o indiferentes.

En 2026 Malú ha retornado a las técnicas convencionales de la plástica, el óleo y la acuarela, sin dejar el soporte digital, pero aprovechando su ahora larga experiencia computacional para la experimentación cromática. “Dejo hacer a las manos”, explica, y pareciera que ellas solas encuentran el equilibrio preciso para la ejecución de líneas y contrastes, e irradia su entusiasmo por la variedad y número de efectos digitales que “te dan ideas”. Hay tantos pinceles y es tan placentero experimentar con ellos hasta lograr reunir un grupo de favoritos que sorprenden.

Ojalá que esta nueva muestra de *Elementos* sirva de invitación a los artistas plásticos de todas las edades a experimentar en la pintura y la gráfica digital, ese es mi deseo, esperando que disfruten mis pinturas, aunque sea con un poquito del enorme placer que ha sido para mí verlas terminadas.



© Malú Méndez Lavielle. *Cuarteto y dos gatos*.



© Malú Méndez Lavielle. *Sala de estar.*

Su obra se puede apreciar en sus redes sociales:

Blogspot: www.visospuestos.blogspot.mx

Youtube: www.youtube.com/watch?v=R-4HSewq3HE

Facebook: www.facebook.com/malu.mendezlavielle

Intagram: <https://www.instagram.com/malumendezlavielle/>



© Malú Méndez Lavielle. *Siameses.*

© Malú Méndez Lavielle. *Jardín.*





El potencial de reposo como estructura disipativa: más allá del modelo de equilibrio

Miguel **Serrano-Reyes**
José **Bargas**

En todas las células vivas existe una diferencia de voltaje a través de la membrana plasmática; es decir, cada célula es una batería que almacena energía potencial eléctrica lista para ser utilizada. Esta energía potencial es el resultado de gradientes iónicos mantenidos de manera contrapuesta, que se acercan a, pero no alcanzan, el equilibrio electroquímico. Se trata en realidad de un desequilibrio que se mantiene relativamente estable gracias al transporte activo de la bomba Na^+/K^+ -ATPasa (Skou, 1957), entre otros intercambiadores iónicos, y que requiere un flujo continuo de energía metabólica para sostenerse. Este tipo de sistema se conoce en termodinámica de no-equilibrio como *steady-state*, que aquí preferimos traducir como “estado estable” en lugar del más común “estado estacionario”, por ser más claro en español y por usarse frecuentemente en otros fenómenos fisiológicos. En muchas clases de células excitables y no excitables, los intercambios a través de la membrana se deben a flujos iónicos y metabólicos que fluctúan continuamente alrededor de un valor llamado “potencial de reposo”. En las células excitables, como fibras musculares, neuronas o células endocrinas, las fluctuaciones de las corrientes iónicas transmembranales producen fenómenos tales como los potenciales de acción.

En células como las fibras cardíacas o las neuronas respiratorias, el potencial de membrana oscila, disparando potenciales de acción de manera continua y formando ciclos que también son relativamente estables, sin un “potencial de reposo” definido. Lejos de representar inactividad celular, como el nombre “reposo” sugiere, el potencial de membrana es una estructura disipativa en estado dinámico (Prigogine, 1969), esencial para la vida. Las estructuras disipativas son sistemas que mantienen su organización mediante el flujo continuo de energía y materia; por ello, cuando los gradientes iónicos se disipan de manera irreversible, la célula muere.

Durante más de un siglo, los textos de fisiología han descrito este fenómeno como un estado de equilibrio electroquímico en el cual la permeabilidad selectiva distribuye iones pasivamente (sin requerir energía), lo que genera gradientes de concentración a través de la membrana y, como consecuencia, el potencial de reposo. Este modelo crea un balance aparente entre las fuerzas que impulsan a disiparse estos gradientes iónicos. El balance se predice con la ecuación de Nernst para el equilibrio electroquímico de cada ion y con la suma ponderada de cada uno de los potenciales de equilibrio de los mismos iones, dada por la ecuación de Goldman-Hodgkin-Katz, donde el factor de ponderación es la permeabilidad selectiva para cada ion, lo que arroja valores que concuerdan razonablemente con la medición experimental. Por ello, este modelo es la visión didáctica estándar.

Sin embargo, esta representación es conceptualmente incompleta. Para empezar, parte de la base de que los valores de los gradientes iónicos ya están presentes; basta introducirlos en la ecuación para obtener como resultado el valor del potencial. Pero la evidencia experimental demuestra que el potencial de reposo es incompatible con un equilibrio electroquímico verdadero, pues, como sucede con las estructuras disipativas, requiere de un consumo continuo de energía para mantener su valor (Attwell y Laughlin, 2001). El potencial de reposo se disipa rápidamente cuando se interrumpe el suministro de ATP o se bloquea la bomba de Na^+/K^+ (Gorman y Marmor, 1974). Como

muchos fenómenos fisicoquímicos, el potencial de reposo es un estado estable fuera del equilibrio que, para mantenerse, necesita un influjo continuo de energía.

Una suerte de contradicción conceptual resulta de la terminología usada: “reposo”, “equilibrio”, cuando, en rigor termodinámico, se trata de un estado estable fuera del equilibrio. Aclarar esta ambigüedad no es una mera curiosidad académica. Como se verá a continuación, influye en cómo interpretamos experimentos, diseñamos modelos teóricos y comprendemos los principios fundamentales del funcionamiento celular.

ANTECEDENTES HISTÓRICOS

Para entender cómo surgió esta ambigüedad conceptual, resulta útil revisar la evolución histórica de las ideas acerca del potencial de reposo.

En 1902, Julius Bernstein formuló la hipótesis que propone que la membrana celular es selectivamente permeable al potasio. Según esta idea, el potencial de reposo debía coincidir o ser muy cercano al potencial de equilibrio (de Nernst) para el ion K^+ , calculable a partir de la relación entre las concentraciones intra y extracelulares del ion. La elegancia conceptual es notable: un solo ion y una sola ecuación explican la polarización eléctrica de las células. Para valores típicos, la ecuación de Nernst predecía un potencial cercano a -90 o -80 mV, próximo a los valores medidos en muchas células: entre -60 y -80 mV. La discrepancia se atribuyó, durante décadas, a limitaciones experimentales. Así, el modelo de Bernstein dominó el campo durante las primeras cuatro décadas del siglo XX.

Una anomalía apareció con los trabajos pioneros de Alan Hodgkin y Andrew Huxley en 1939, quienes realizaron registros intracelulares en el axón gigante de calamar. Observaron que, durante el potencial de acción, la membrana no solo perdía su polarización, sino que esta se invertía, tomando valores positivos de entre +40 a +50 mV, lo que resulta incompatible con el modelo de equilibrio basado únicamente en el ion K^+ .

La solución vino de David Goldman en 1943, quien propuso una ecuación general que considera la suma de los potenciales de equilibrio del potasio, sodio y

cloro, ponderada con las permeabilidades relativas de cada uno de ellos. Refinada posteriormente por Hodgkin y Bernard Katz, la formulación proporciona una aproximación bastante precisa del potencial de reposo y predice el valor que toma este cuando las permeabilidades relativas cambian. El modelo fue completado con la serie de trabajos que culminaron en las ecuaciones de Hodgkin-Huxley (Hodgkin y Huxley, 1952), que describen las conductancias iónicas voltaje-dependientes de manera cuantitativa.

Dado que la ecuación de Goldman-Hodgkin-Katz (ecuación GHK) describe exitosamente el valor del potencial de membrana (V_m) a partir de los gradientes iónicos contrapuestos, el concepto de “equilibrio” continúa utilizándose. De hecho, en muchos textos se llega a plantear una ecuación “equivalente” a la de GHK a partir de un circuito RC, usando conductancias en vez de permeabilidades, y asumiendo que en reposo la corriente transmembranal surge de la suma de las corrientes de cada ion igual a cero; es decir, en equilibrio electroquímico ($I_{Na} + I_K + I_{Cl} = 0$) (Hille, 2001). Es justo reconocer que algunos autores interpretan esta condición como una aproximación de estado estable, no como un equilibrio termodinámico estricto; sin embargo, el lenguaje de “equilibrio” persiste en muchos textos introductorios, lo que genera la confusión conceptual que aquí señalamos.

Al mismo tiempo, se reconoce explícitamente el carácter de no-equilibrio de V_m , pues si la bomba de Na^+/K^+ deja de funcionar, los gradientes iónicos se disipan y el potencial se despolariza. Por lo que, en algunos textos, se adopta la opinión opuesta: V_m es “causado” por la bomba de Na^+/K^+ . Esto se presta a mayor confusión cuando el estudiante lee distintos textos.

En realidad, los flujos iónicos pasivos contrapuestos oscilan cerca del equilibrio, y el transporte activo de la bomba electrogénica parece usar la energía óptima para mantenerlo. Si la bomba cesa, el potencial se despolariza rápidamente (además, hay otros intercambiadores electrogénicos que no mencionaremos aquí). Es decir, la ecuación GHK parte de unos gradientes que ya asumen que la bomba está haciendo su trabajo. La pequeña corriente electrogénica activa que genera la bomba es necesaria para generar la estabilidad de V_m , pues compensa la fuga

hacia adentro del Na^+ y la fuga hacia afuera del K^+ , evitando que los gradientes se disipen. Por tanto, la condición de estado estable no es simplemente $I_{Na} + I_K + I_{Cl} = 0$, sino que debe incluir la contribución de la bomba: $I_{Na} + I_K + I_{Cl} + I_{bomba} = 0$. Esta formulación desplaza el origen del estado estable desde un balance puramente pasivo hacia un equilibrio activo-pasivo, acoplado al metabolismo celular. Esto nos lleva a la modificación de la ecuación GHK propuesta por Clay Armstrong ya en este siglo XXI (Armstrong, 2003), pero que aún no se incorpora en la mayoría de los libros de texto, lo que le da pertinencia al presente artículo.

El problema, para el estudiante que ya cuenta con lenguajes de programación de alto nivel, surge cuando trata de modelar computacionalmente el potencial de reposo ignorando el transporte activo: se tienen que proporcionar valores muy particulares y arbitrarios para las corrientes de fuga de cada uno de los iones predominantes: Na^+ , K^+ y Cl^- . Además, cada uno de los canales dependientes de voltaje tiene contribuciones determinadas de corriente dependiendo del potencial desde el cual se quieran iniciar las simulaciones. Para lograr un “potencial de reposo” desde el cual partir, hay que buscar valores para las corrientes de todos los canales presentes en el potencial objetivo, de manera que la suma de todas genere una corriente neta igual a cero, simulando el equilibrio. Esta condición inicial es necesaria para lograr un “potencial de reposo” que solo se mantiene estable en ausencia de perturbaciones. Pero en realidad, incluir el transporte activo dentro de las corrientes que contribuyen al “potencial de reposo” agrega el elemento termodinámico que depende de la energía metabólica, lo que convierte a la simulación en un sistema disipativo más cercano a la realidad (Krishnan *et al.*, 2015).

EVIDENCIA EXPERIMENTAL

CONTRA EL MODELO DE EQUILIBRIO

Si el potencial de reposo correspondiera a un equilibrio termodinámico verdadero, debería mantenerse indefinidamente sin gasto energético. La evidencia experimental demuestra de forma contundente lo contrario:



• *Dependencia metabólica.* Cuando se bloquea la bomba de Na^+/K^+ con glicósidos digitálicos, los gradientes iónicos de Na^+ y K^+ se disipan gradualmente y el potencial de membrana pierde su polaridad en cuestión de minutos (Gorman y Marmor, 1974). Un equilibrio verdadero sería independiente del transporte activo. Del mismo modo, cuando se bloquea la producción de ATP (e.g., con cianuro), el potencial se disipa rápidamente, aunque este procedimiento afecta múltiples procesos celulares además de la membrana.

• *Magnitud del gasto energético.* Estudios experimentales han estimado que la bomba Na^+/K^+ -ATPasa, principal responsable de mantener los gradientes iónicos en su estado estable, consume entre 20 % y 75 % del ATP disponible en las neuronas, dependiendo del tipo celular y su nivel de actividad. Esta fracción extraordinariamente alta del presupuesto energético celular resulta difícil de conciliar con la noción de un equilibrio pasivo. De hecho, se ha estimado que, en el cerebro, los potenciales de acción consumen 47 % de energía, los efectos postsinápticos 34 %, y el mantenimiento del potencial de reposo 13 % (Attwell y Laughlin, 2001). Todo este gasto energético es necesario para mantener los valores de gradientes que los estudiantes simplemente introducen en la ecuación

GHK como constantes dadas, sin considerar el trabajo termodinámico continuo que requieren.

• *Densidad energética requerida.* Para restaurar los gradientes iónicos tras la actividad celular, se requieren entre 10^{11} y 10^{12} moléculas de ATP por cm^2 de membrana (Attwell y Laughlin, 2001). Estas magnitudes ilustran el trabajo continuo necesario para contrarrestar la difusión pasiva de iones.

• *Naturaleza dinámica del sistema.* El potencial de membrana presenta fluctuaciones permanentes alrededor de su valor medio debido a la apertura y cierre estocástico de canales iónicos individuales. Estas fluctuaciones, medibles con técnicas de patch-clamp, evidencian un sistema en flujo constante de procesos o fluctuaciones microscópicas, característico de estados dinámicos, no de equilibrios termodinámicos (Prigogine, 1969).

EL PROBLEMA CONCEPTUAL Y SUS IMPLICACIONES

El potencial de reposo no es un equilibrio pasivo, sino una estructura disipativa que requiere suministro metabólico constante para no disiparse (Prigogine, 1969). El equilibrio termodinámico verdadero implica que un sistema ha alcanzado un estado de máxima entropía, sin cambios macroscópicos netos y sin necesidad de trabajo externo para mantenerse. El potencial de reposo exhibe las características



© Maiú Méndez Laville. Quinteto.

opuestas: requiere gasto energético constante, presenta fluctuaciones continuas y se disipa cuando falta el suministro.

En rigor, el equilibrio electroquímico equivaldría a la disipación completa de gradientes iónicos (aumento de entropía) y la inactividad metabólica: una célula muerta. El potencial de reposo, en cambio, representa organización activa mantenida lejos del equilibrio mediante flujos de energía y materia. La simplificación didáctica es útil hasta cierto punto, pero ignora los millones de años que le tomó a la autoorganización de la materia y a la selección natural el generar células vivas.

Es importante notar que, mientras las membranas biológicas mismas (bicapas lipídicas) son estructuras autoensambladas, las funciones de membrana como el transporte y la excitabilidad involucran procesos disipativos que requieren flujo continuo de energía (Goldbeter, 2018).

IMPLICACIONES

- *Para la investigación.* Los modelos teóricos deben incorporar flujos energéticos explícitamente, no asumir condiciones de equilibrio. Los modelos computacionales que ignoran la dinámica de la bomba fallan en capturar características importantes del comportamiento neuronal, incluyendo adaptación

de frecuencia de disparo y transiciones a estados patológicos (Krishnan *et al.*, 2015).

- *Para la interpretación experimental.* Las perturbaciones metabólicas, como la señalización por segundos mensajeros o la activación de receptores acoplados a proteínas G, pueden modificar el potencial de membrana. Por tanto, no deben asumirse “propiedades intrínsecas” celulares sin considerar el contexto metabólico y de señalización. Dado que mucha de esta señalización es constitutiva (activa continuamente a diferentes niveles), las propiedades medidas en células aisladas pueden diferir significativamente de las observadas *in situ*. Esta diferencia subraya la importancia de considerar al potencial de reposo como parte de un sistema disipativo integrado en el contexto celular completo.

- *Para la enseñanza.* Los estudiantes deben tener claro que el “reposo” celular involucra trabajo metabólico continuo, no inactividad (Cardozo, 2016). La confusión terminológica entre “potencial de equilibrio” (que no requiere energía) y el potencial de reposo (que sí la requiere) representa un error conceptual común que debe ser abordado explícitamente en la educación fisiológica. Describir el potencial de reposo como un ‘estado estable con flujo continuo de energía’ ayuda a evitar esta confusión conceptual.



• *Para la modelación computacional.* Decidir conscientemente si se incorpora el transporte activo o no. Para simulaciones de larga duración o actividad repetida, ignorar la bomba conduce a una deriva progresiva del potencial de membrana y eventual falla del modelo (Krishnan *et al.*, 2015).

Reconocer el potencial de reposo como una estructura disipativa integrada en el sistema complejo celular puede ser la puerta de entrada al estudio de los conceptos necesarios para entender otros sistemas, más complejos, alejados del equilibrio termodinámico, lo que permite una comprensión más profunda y precisa de fenómenos fundamentales de la biología celular.

REFERENCIAS

Armstrong CM (2003). The Na/K pump, Cl ion, and osmotic stabilization of cells. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 100(10):6257-6262. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0931278100>.

Attwell D and Laughlin SB (2001). An energy budget for signaling in the grey matter of the brain. *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism* 21(10):1133-1145. DOI: <https://doi.org/10.1097/00004647-200110000-00001>.

Cardozo D (2016). An intuitive approach to understanding the resting membrane potential. *Advances in Physiology Education* 40(4):543-547. DOI: <https://doi.org/10.1152/advan.00049.2016>.

Goldbeter A (2018). Dissipative structures in biological systems: Bistability, oscillations, spatial patterns and waves. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 376(2124): 20170376. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0376>.

Gorman AL and Marmor MF (1974). Long-term effect of ouabain and sodium pump inhibition on a neuronal membrane. *The Journal of Physiology* 242(1):37-47. DOI: <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1974.sp010693>.

Hille B. (2001). *Ion channels of excitable membranes* (3rd ed.). Sunderland, Massachusetts USA: Sinauer Associates.

Hodgkin AL and Huxley AF (1952). A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. *Journal of Physiology* 117(4):500-544. DOI: <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1952.sp004764>.

Krishnan GP, Filatov G, Shilnikov A and Bazhenov M (2015). Electrogenic properties of the Na⁺/K⁺ ATPase control transitions between normal and pathological brain states. *Journal of Neurophysiology* 113(9):3356-3374. DOI: <https://doi.org/10.1152/jn.00460.2014>.

Prigogine I (1969). Structure, dissipation and life. In M. Marois (Ed.), *Theoretical Physics and Biology* (pp. 23-52). Amsterdam: North-Holland Publishing Company.

Skou JC (1957). The influence of some cations on an adenosine triphosphatase from peripheral nerves. *Biochimica et Biophysica Acta* 23(2):394-401. DOI: [https://doi.org/10.1016/0006-3002\(57\)90343-8](https://doi.org/10.1016/0006-3002(57)90343-8).

Miguel Serrano-Reyes
Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México
mserrano@ifc.unam.mx

José Bargas
Instituto de Fisiología Celular
Universidad Nacional Autónoma de México

Resistencia antimicrobiana: de dónde venimos, dónde estamos y hacia dónde vamos

Alexis Tizatl-Chazari
José Carlos Arroyo Kuribreña

Desde tiempos remotos, la humanidad ha buscado estrategias para tratar las infecciones. Existe evidencia histórica de que civilizaciones antiguas empleaban remedios tradicionales como el uso tópico de pan enmohecido para el tratamiento de infecciones cutáneas, con numerosas referencias a sus efectos benéficos en el antiguo Egipto, China, Serbia y Grecia. (Gould, 2016)

En Mesoamérica, los chamanes mexicas poseían un profundo conocimiento sobre la flora local y su utilidad para el tratamiento de enfermedades. Para ellos la miel era considerada un “alimento de los dioses” y era aplicada directamente sobre las heridas para ayudar en la cicatrización y prevención de infecciones, práctica que se mantiene en la actualidad por el efecto hiperosmolar que, hoy sabemos, se debe a la alta densidad de la miel y a su acción deshidratante en las bacterias invasoras, causando su muerte.

El uso del maguey (*Agave* spp.) para el tratamiento de heridas se encuentra documentado en la tradición médica mesoamericana. Fuentes como el Códice Florentino y diversos cronistas coloniales describen la aplicación de su savia como un remedio eficaz para limpiar, desinfectar y favorecer la cicatrización de lesiones. (Ortiz de Montellano, 1990).

Durante siglos, la humanidad dependió casi exclusivamente del uso de plantas con propiedades antimicrobianas y del aseo de heridas como únicos recursos frente a las infecciones. El cambio comenzó en el siglo XX, cuando en 1910 Paul Ehrlich introdujo el Salvarsán® (arsfenamina), primer quimioterápico sintético eficaz contra la sífilis, con el gran inconveniente de tener una alta toxicidad. En 1928, cuando Alexander Fleming observó que un hongo, el *Penicillium notatum*, liberaba una sustancia capaz de inhibir el crecimiento de *Staphylococcus aureus* sin afectar al ser humano, algo que era una inquietud de Fleming. Este hallazgo inesperado marcó el inicio de la era de los antibióticos y transformó para siempre la medicina moderna. Más adelante, en 1932, Gerhard Domagk descubrió las sulfonamidas, que se convirtieron en los primeros antibióticos utilizados de manera rutinaria en la práctica clínica. En 1940, Abraham y Chain descubrieron que una cepa de la bacteria *E. coli* podía inactivar la penicilina mediante la producción de una enzima llamada penicilinas, documentando un mecanismo evolutivo de las bacterias para generar resistencia a los antibióticos. El impacto de la penicilina en la sociedad se consolidó cuando, en 1941, en Peoria, Illinois, EE. UU., se logró la producción a gran escala del antibiótico, haciéndolo finalmente disponible a fines de 1943, lo que disminuyó significativamente las muertes por infecciones en la Segunda Guerra Mundial. Fleming fue galardonado por su descubrimiento con el premio Nobel de Medicina en 1945, junto a los químicos Ernst Boris Chain y Howard Walter Florey (Gaynes, 2017).

De forma notable, Fleming advirtió desde 1945 que el mal uso de antibióticos podría ocasionar una “era de abuso”. Una hipótesis que, desafortunadamente, se ha vuelto una realidad alarmante.

CÓMO ACTÚAN LOS ANTIBIÓTICOS

En términos generales, los antibióticos se pueden agrupar en cuatro categorías con base en su mecanismo de acción (Halawa *et al.*, 2023):

Antibióticos que inhiben la síntesis de la pared celular, fundamental para mantener la forma y resistencia bacteriana frente a la presión osmótica del ambiente.

Los β -lactámicos (como penicilinas, cefalosporinas y carbapenémicos) y los glicopéptidos (como la vancomicina) actúan bloqueando las enzimas que forman y entrecruzan el peptidoglicano, lo que conduce a la lisis de la célula bacteriana.

Antibióticos que dañan la membrana celular. Las polimixinas, por ejemplo, se insertan en la membrana externa de bacterias gramnegativas y aumentan su permeabilidad, mientras que la daptomicina, un lipopéptido cíclico, se inserta igualmente en la membrana, pero en bacterias grampositivas, formando canales iónicos que despolarizan la membrana; ambas llevan a un rápido deterioro de funciones vitales de las bacterias. Aunque son agentes bactericidas muy potentes, su toxicidad renal y neurológica limita su uso clínico.

Antibióticos que interfieren con la síntesis proteica. Estos actúan en las subunidades ribosómicas bacterianas 30S y 50S: Los aminoglucósidos y tetraciclinas actúan sobre la unidad 30S; mientras que en la 50S lo hacen los macrólidos, el cloranfenicol y las oxazolidinonas. Al bloquear la traducción de proteínas esenciales, generan efectos bacteriostáticos o bactericidas, según el tipo de fármaco y la dosis empleada.

Antibióticos que actúan sobre los ácidos nucleicos o rutas metabólicas críticas. Las quinolonas y la rifampicina interfieren con la replicación del ADN o la transcripción del ARN, procesos indispensables para la multiplicación bacteriana. Por otro lado, fármacos como las sulfonamidas y el trimetoprim inhiben la síntesis de ácido fólico, un cofactor esencial para la producción de nucleótidos.

¿QUÉ ES LA RESISTENCIA ANTIMICROBIANA?

A lo largo de su evolución, las bacterias han desarrollado múltiples mecanismos para evadir la acción de los antibióticos, lo que constituye el componente principal de la resistencia antimicrobiana. Entre los más relevantes se encuentran:

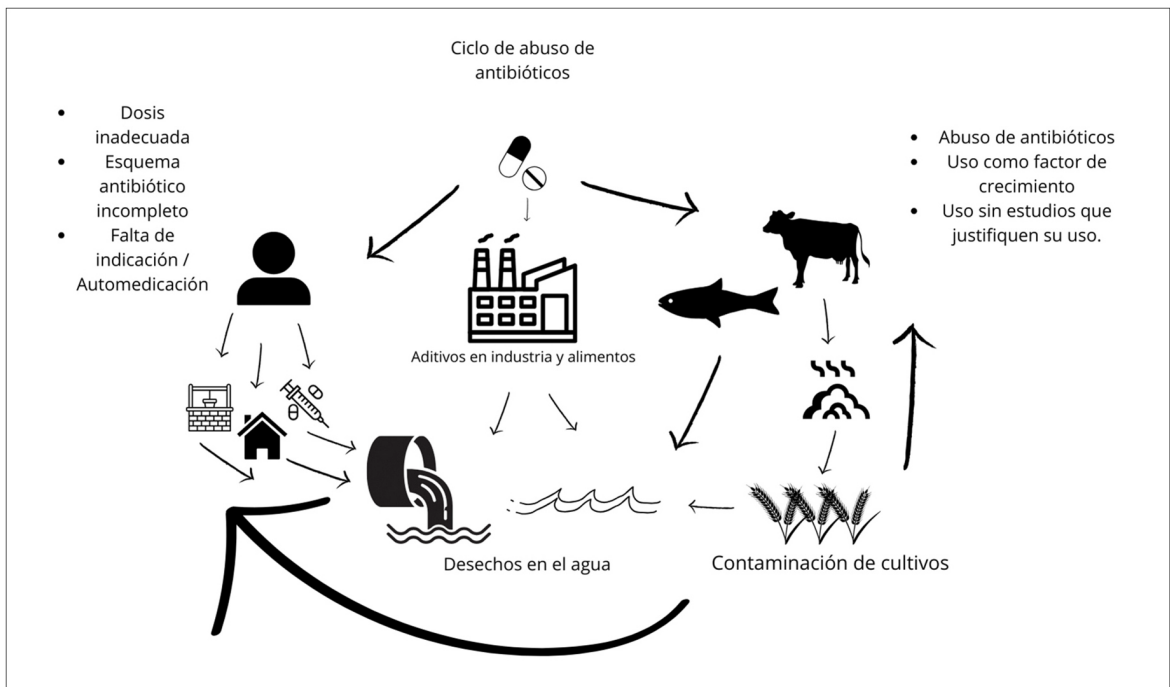


Figura 1. Ciclo del abuso de antibióticos en salud humana, animal y medio ambiente. Elaboración propia con base en Halawa *et al.* (2024) y FAO (2022).

- Destrucción o modificación del fármaco, como ocurre con las β -lactamasas y las enzimas que inactivan aminoglucósidos.
- Cambio en el sitio blanco de acción del fármaco, ya sea por mutaciones, adquisición de genes alternativos (como *mecA* en *Staphylococcus aureus*, que lo hace resistente a metilina) o modificaciones enzimáticas que reducen la afinidad del antibiótico.
- Generación de proteínas de protección o sobreproducción del blanco molecular, lo que permite mantener procesos esenciales aun en presencia del antimicrobiano.
- Disminución de la permeabilidad de la membrana bacteriana, como sucede en gérmenes gramnegativos.
- Expulsión activa de los antibióticos mediante bombas de eflujo que contribuyen a reducir la concentración intracelular del fármaco.
- Adaptaciones regulatorias globales, que modifican el metabolismo y la composición de la membrana, favoreciendo la supervivencia en presencia de antibióticos (Christaki *et al.*, 2020).

Estos mecanismos pueden presentarse aislados o en combinación en una misma bacteria, y producen resistencia a varias familias de antibióticos con

diferentes mecanismos de acción; estas variaciones pueden ser heredadas por las bacterias a su descendencia y también pueden compartirse (a través de plásmidos que contienen genes) a bacterias que se encuentren en el ambiente, un fenómeno conocido como transferencia horizontal. Estos factores explican la rápida expansión de la resistencia en entornos hospitalarios y en la comunidad, y además reflejan la adaptación de las bacterias para lograr la supervivencia en un ambiente hostil, reflejando procesos evolutivos naturales que favorecen la supervivencia en ambientes hostiles.

¿POR QUÉ SE HA INCREMENTADO LA RESISTENCIA ANTIMICROBIANA EN EL MUNDO ACTUAL?

El aumento de la resistencia antimicrobiana es un fenómeno complejo, resultado de múltiples factores que interactúan en distintos ámbitos. En la medicina humana, el uso inadecuado de antibióticos por automedicación, la idea errónea de que los antibióticos sirven para tratar infecciones virales



© Malú Méndez Lavielle. Diciembre.

o inflamatorias no infecciosas, y la venta sin receta o valoración médica, favorecen la selección de bacterias resistentes.

En el ámbito veterinario y agropecuario, los antibióticos se utilizan de forma rutinaria para prevenir infecciones que podrían diezmar grandes poblaciones de animales, o incluso como factores promotores del crecimiento. Estas prácticas que se realizan la mayoría de las veces sin el respaldo de pruebas microbiológicas ni sustento científico. Esto contribuye al desarrollo de cepas multirresistentes que posteriormente se comparten con el consumo humano.

En paralelo, la aplicación de antimicrobianos en productos agrícolas, pinturas o artículos de uso cotidiano genera reservorios ambientales de resistencia, contaminando suelos, aguas subterráneas y, en última instancia, la cadena alimentaria (Salam *et al.*, 2023). Los medicamentos administrados a

personas y animales, ya sea para tratar infecciones, como profilaxis o como promotores de crecimiento, terminan en el ambiente a través de excretas, desechos hospitalarios, aguas residuales o prácticas agrícolas. Estos compuestos llegan a suelos, cultivos y cuerpos de agua, lo que favorece la aparición y diseminación de bacterias resistentes, las cuales pueden reincorporarse al ser humano por vía alimentaria, hídrica o ambiental. Así, el uso inadecuado de antibióticos en cualquiera de estos ámbitos alimenta un ciclo continuo que facilita la expansión global de la RAM. (Figura 1)

Factores sociales y económicos favorecen un incremento del consumo de antibióticos en países en desarrollo, impulsado por el crecimiento económico y la falta de regulaciones estrictas que, combinado con la globalización y la movilidad internacional de los individuos, facilita la propagación de bacterias resistentes en todo el mundo. Por otro lado, la ausencia de programas sólidos de educación, vigilancia epidemiológica y control del uso

de antibióticos en los sistemas de salud agravan aún más el problema.

Finalmente, la escasez de innovación farmacéutica y la limitada creación de antibióticos con nuevos mecanismos de acción han dejado a la medicina moderna con un arsenal terapéutico cada vez más restringido frente a los patógenos multirresistentes en la práctica médica mundial (Salam *et al.*, 2023).

¿QUÉ SE ESTÁ HACIENDO EN EL MUNDO PARA DISMINUIR LA RESISTENCIA ANTIMICROBIANA?

La resistencia antimicrobiana (RAM) representa una de las mayores amenazas para la salud pública del siglo XXI. Ya en el año 2019 las infecciones por bacterias multirresistentes fueron la causa directa de 1.27 millones de muertes y estuvieron asociadas con 5 millones de fallecimientos en todo el mundo (O'Neill *et al.*, 2016). De acuerdo con un estudio sobre RAM, las infecciones por microorganismos resistentes podrían ser causantes de 10 millones de muertes anuales para el año 2050, una cifra incluso mayor que las cifras de muerte por cáncer.

La respuesta internacional a esta problemática ha sido el enfoque Una Salud, bajo el lema “Al proteger a uno, ayudamos a proteger a todos”. Este enfoque reconoce la interconexión entre la salud humana,

animal y ambiental, y está siendo empleado para coordinar la prevención multisectorial, preparación y esfuerzos de respuesta contra enfermedades zoonóticas que pueden transmitirse de animales a humanos, así como en esfuerzos internacionales para crear conciencia y educación sobre la RAM y su impacto en la salud del medio ambiente, animales y humanos. Además, se publicó en el año 2015 un Plan de Acción Mundial sobre la RAM, por la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y la Organización Mundial de Salud Animal (OMSA), que invita a los países en forma global a desarrollar un plan de acción nacional que incluyera medidas de vigilancia, uso racional de antibióticos y educación pública (OMS, 2015).

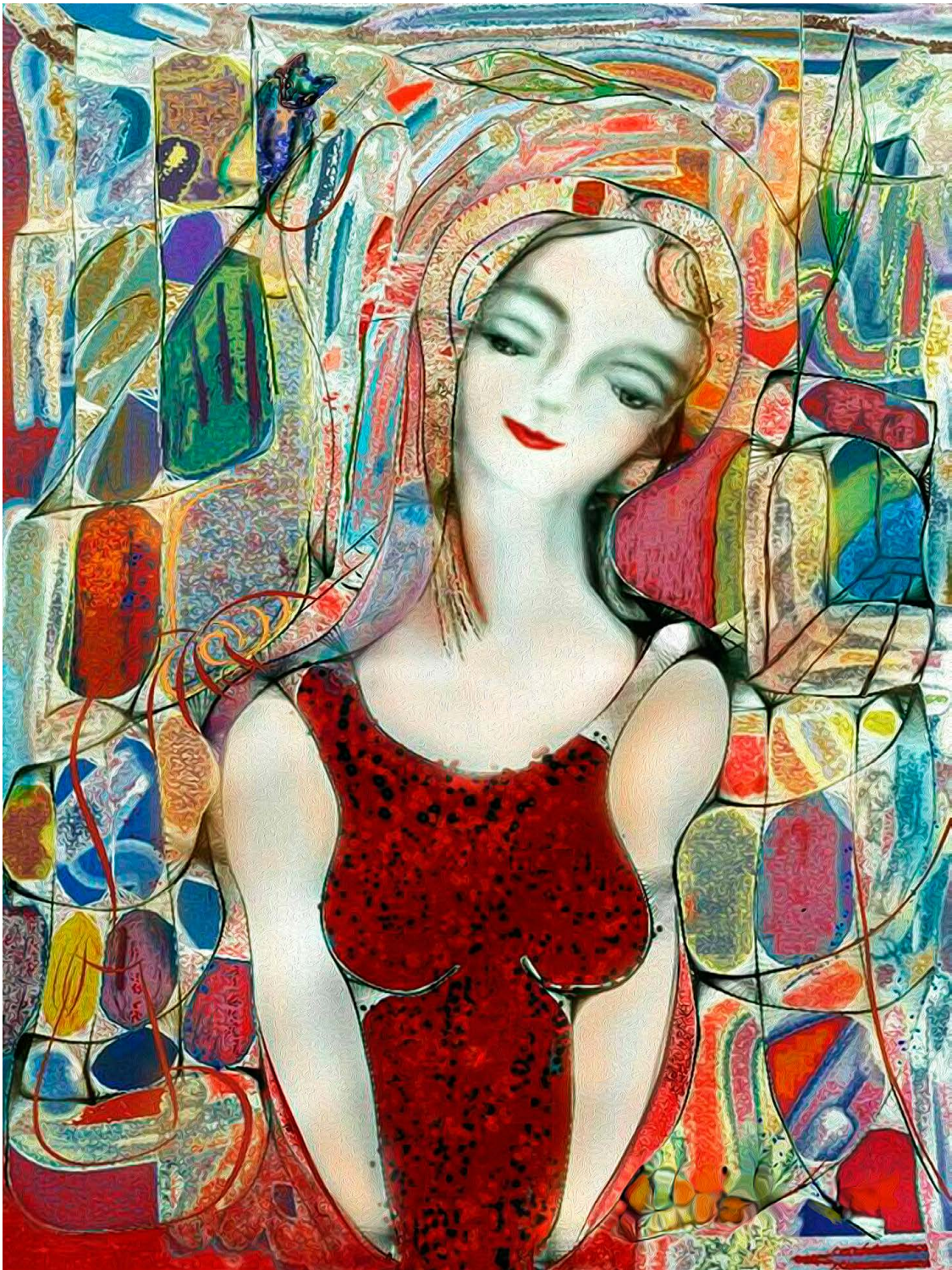
En México, en 2018 se inició la Estrategia Nacional de Acción contra la RAM, alineada con las recomendaciones internacionales, que incluye cuatro objetivos: 1) Mejorar la concientización y comprensión respecto a la RAM mediante comunicación efectiva, educación y capacitación. 2) Reforzar los conocimientos y evidencia de la RAM mediante vigilancia epidemiológica e investigación en salud humana y animal. 3) Reducción de la incidencia de infecciones mediante medidas de higiene preventivas. 4) Uso óptimo y racional de antibióticos, tanto en salud humana como animal (Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Alimentaria o SENASICA, s.f.)

Existen también en México estudios aislados de reportes de las RAM en hospitales o, en forma regional, con un proyecto respaldado por institutos y la Universidad Autónoma de México llamado Plan Universitario Contra la Resistencia Antimicrobiana (PUCRA) en el que se centralizan los resultados reportados por diferentes instituciones a nivel nacional (UNAM, 2024).

Las líneas de acción de prioridad para combatir la RAM incluyen el fortalecimiento de programas de vigilancia y uso racional de antibióticos, educación a la población y profesionales de salud para

© Malú Méndez Lavielle. Aluzado.





distinguir infecciones bacterianas de virales y la creación de sistemas de vigilancia global como GLASS (Global Antimicrobial Resistance Surveillance System).

A pesar de todas estas medidas es necesario el desarrollo de nuevos antibióticos y estrategias alternativas para enfrentar infecciones por bacterias multirresistentes, entre las que destacan: la fagoterapia, que utiliza virus bacteriófagos capaces de atacar y destruir bacterias específicas; los anticuerpos

monoclonales dirigidos a bacterias concretas para neutralizarlas; y las vacunas terapéuticas, que previenen infecciones y activan el sistema inmune reduciendo el uso de antibióticos (Czaplewski *et al.*, 2016). Estas estrategias ofrecen nuevas perspectivas para controlar la RAM y destacan la importancia de la investigación científica para proteger la salud humana y animal.

A escala global, la base de datos mundial sobre antibióticos destinados a los animales, ANIMUSE, ha contribuido a proporcionar información para que los países reduzcan el uso excesivo e indebido de medicamentos y frenen la propagación de la RAM, con más del 80 % de países reportando información. (WOAH, s.f.) En 2024, la ONU fijó como meta reducir en un 10 % las muertes relacionadas con la RAM para 2030, y una reducción en el uso de antibióticos dentro del sector agroalimentario, haciendo al mismo tiempo un llamado a una acción urgente y a mayores incentivos para la investigación y el desarrollo en RAM.

REFERENCIAS

Christaki E, Marcou M y Tofarides A (2020). Antimicrobial resistance in bacteria: mechanisms, evolution, and persistence. *Journal of Molecular Evolution* 88(1):26-40.

Czaplewski L, Bax R, Clokie M, Dawson M, Fairhead H, Fischetti VA, *et al.* (2016). Alternatives to antibiotics: a pipeline portfolio review. *The Lancet Infectious Diseases* 16(2):239-251.

FAO (2022). *Animal production*. Recuperado de: <https://www.fao.org/antimicrobial-resistance/key-sectors/animal-production/en/> (consultado el 12 de noviembre de 2022).

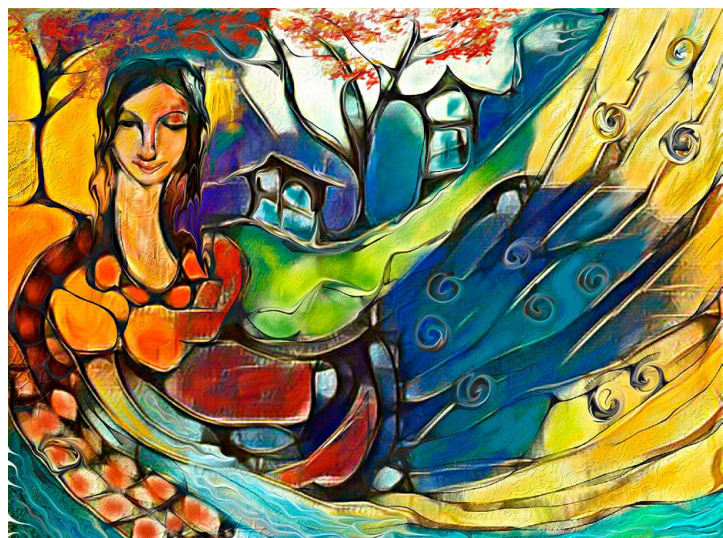
Gaynes R (2017). The discovery of penicillin-New insights after more than 75 years of clinical use. *Emerging Infectious Diseases* 23(5):849-853. <https://doi.org/10.3201/eid2305.161556>.

Gould K (2016). Antibióticos: desde la prehistoria hasta nuestros días. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy* 71(3):572-575.

Halawa S, El-Baky RMA, Hetta HF, *et al.* (2023). Antibiotic action and resistance: updated review of mechanisms, spread, influencing factors, and alternative approaches. *Infection and Drug Resistance* 16:543-563.

O'Neill J *et al.* (2016). *Tackling Drug-Resistant Infections Globally: Final Report and Recommendations*. Review on Antimicrobial Resistance. Wellcome Trust y HM Government.

OMS (2015). *Plan de acción mundial sobre la resistencia a los antimicrobianos*. Ginebra: Organización Mundial de la Salud.



© Malú Méndez Lavielle. *Franboyán*.

Ortiz de Montellano B (1990). *Aztec Medicine, Health, and Nutrition*. Rutgers University Press, pp. 220-221.

Salam MA, Al-Amin MY, Salam MT, Pawar JS, Akhter N, Rabaan AA y Alqumber MAA (2023). Antimicrobial resistance: A growing serious threat for global public health. *Healthcare* 11(13):1946.

Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA) (s.f.). *Estrategia Nacional contra la Resistencia a los Antimicrobianos (RAM)*. Recuperado de: <https://www.gob.mx/senasica/acciones-y-programas/resistencia-a-los-antimicrobianos-ram>.

UNAM (2024). Programa Universitario de Ciencia, Tecnología e Innovación: PUC-RA 2024. Universidad Nacional Autónoma de México, Coordinación de Investigación Científica. Recuperado de: <https://puiree.cic.unam.mx/divulgacion/docs/pucra2024.pdf>.

WOAH (2024). *Towards a Healthier Future for All: Progress in Animal Health to Contain Antimicrobial Resistance*. Paris: World Organisation for Animal Health. 32 pp. <https://doi.org/10.20506/woah.3536>.

WOAH (s.f.). ANIMUSE: Global database on antimicrobial use in animals. Recuperado de: <https://amu.woah.org/amu-system-portal/cms/faq>.

Alexis Tizatl-Chazari
Escuela de Ciencias de la Salud
Universidad Anáhuac Puebla
José Carlos Arroyo Kuribreña
Escuela de Ciencias de la Salud
Universidad Anáhuac Puebla
Servicio de Urología
Hospital Ángeles de Puebla
jcakuropologia@yahoo.com.mx



© Malú Méndez Lavielle. *Caracolas*.

Tecnologías reproductivas para conservar vida

Angélica **Trujillo Hernández**

La historia de la vida también es la historia de la pérdida. A lo largo de millones de años, los linajes han aparecido y desaparecido en un flujo continuo, pero la velocidad de pérdida actual es inusual: la actividad humana ha comprimido en décadas procesos que antes requerían miles de años. La fragmentación de hábitats, sobreexplotación, especies invasoras, contaminación y cambio climático son la causa de la reducción de poblaciones hasta el punto de no retorno (Sala *et al.*, 2000). Frente a esta situación, la conservación ha evolucionado de enfoques centrados en áreas protegidas a estrategias integrales que incluyen genética de poblaciones, restauración ecológica, ciencia ciudadana y, más recientemente, la biotecnología reproductiva.

Las tecnologías de reproducción asistida (TRA) nacieron para tratar la infertilidad humana y optimizar la producción animal; sin embargo, su naturaleza modular –capaces de reemplazar o apoyar etapas específicas del proceso reproductivo– las vuelve herramientas adaptables para la fauna silvestre (Comizzoli y Holt, 2019). Hoy, laboratorios y zoológicos colaboran con áreas naturales protegidas, comunidades locales y biobancos para conservar no solo individuos, sino alelos, linajes y comportamientos que sustentan la resiliencia evolutiva. Este artículo describe las principales TRA, presenta casos reales y actualizados, y reflexiona sobre el uso de la biotecnología para expandir el repertorio de acciones de conservación.

DE LA BIOLOGÍA REPRODUCTIVA A LA BIOTECNOLOGÍA

La reproducción en la naturaleza es el resultado de la fisiología, el comportamiento y el ambiente. Muchas especies sincronizan su reproducción con la duración del día, las estaciones o las condiciones de humedad; otras dependen de señales químicas o del propio apareamiento para ovular, como en el caso de felinos y camélidos, cuyas hembras tienen ovulación inducida por cópula (Székely, 2023). Replicar estas condiciones bajo cuidado humano exige conocer la endocrinología de cada especie (perfil de estrógenos, progesterona, LH, FSH), la estacionalidad, la edad de la pubertad o de la primera conducta reproductiva y la anatomía del aparato reproductor (Székely, 2023). Con esa base es posible diseñar y aplicar biotecnologías reproductivas para apoyar la conservación.

En especies con poblaciones remanentes pequeñas, la prioridad biológica es doble, maximizar la tasa de nacimientos y preservar la diversidad genética. Esto implica planificar cruces para evitar endogamia, rescatar alelos mediante el uso rotacional de machos y, cuando sea factible, incorporar material genético histórico desde biobancos. Los biobancos son lugares importantes de conservación de la biodiversidad; no solo almacenan espermatozoides u óvulos, también resguardan líneas celulares vivas, tejidos y ADN. El biobanco del Frozen Zoo (San Diego Zoo Wildlife Alliance) reporta más de 11,500 líneas celulares de ~1,300 especies y subespecies, además de gametos de cientos de taxa (Mooney *et al.*, 2023).

TECNOLOGÍAS DE REPRODUCCIÓN ASISTIDA APLICADAS A FAUNA SILVESTRE

Las TRA son un conjunto de herramientas que permite sustituir o asistir etapas clave del proceso reproductivo de animales, especialmente aquellos de difícil manejo en cautiverio. Un ejemplo es la inseminación artificial (IA), que consiste en introducir semen en el tracto reproductor de la hembra sin apareamiento directo (Mastromonaco, 2024).

En especies grandes como elefantes y rinocerontes se realiza con guía endoscópica o ecográfica. La IA reduce riesgos de agresión entre individuos, evita traslados largos y permite inseminar animales que jamás coincidirían en espacio o tiempo. Para colectar el semen puede utilizarse la electroeyacuación bajo anestesia ligera, el masaje prostático (en carnívoros) o la recuperación *post mortem*. Una vez obtenido, el semen debe ser evaluado, y puede ser criopreservado mediante distintos protocolos que mejoran la tolerancia del espermatozoide a la congelación. La criopreservación permite planificar apareamientos a largo plazo, compartir material genético entre instituciones y resguardar linajes únicos (Mastromonaco, 2024).

En el caso de las hembras, las TRA incluyen la estimulación ovárica y la recuperación de ovocitos, para lo cual es necesario el uso de compuestos químicos llamados gonadotropinas; la recuperación se realiza por aspiración transvaginal ecoguiada o por laparoscopia en especies pequeñas.

Los ovocitos se usan en técnicas de fertilización *in vitro* (FIV), en las que ovocitos y espermatozoides se incuban en medios que imitan el oviducto; otra técnica es la inyección intracitoplasmática de espermatozoides (ICSI), en la que un espermatozoide se inyecta directamente en el ovocito, lo que es útil cuando la motilidad o el número de espermatozoides es bajo. Tras 2 a 7 días de cultivo *in vitro*, los embriones se transfieren a hembras receptoras de la misma especie del embrión; sin embargo, cuando no hay hembras receptoras disponibles de la misma especie, se emplean hembras de especies estrechamente emparentadas (Mastromonaco, 2024).

Otra herramienta relevante en la conservación de especies es la clonación que, aunque ha permitido reintroducir diversidad genética histórica en algunas especies, sigue siendo experimental y marginal en términos poblacionales.

Por último, una técnica emergente y con muchas limitaciones es la generación de gametos a partir de células madre pluripotentes, lo que podría abrir nuevas posibilidades para la conservación de especies en peligro al permitir la obtención de espermatozoides

y óvulos a partir de individuos no reproductivos o de líneas celulares históricas preservadas en biobancos. (Mastromonaco, 2024).

CASOS EMBLEMÁTICOS Y LECCIONES APRENDIDAS

El uso de las TRA en la conservación de la fauna es aún puntual, costosa y altamente dependiente del contexto; a continuación, se describen algunos casos. Empezaremos con el hurón de patas negras (*Mustela nigripes*). Declarado extinto en la naturaleza en 1979, una pequeña población sobreviviente permitió iniciar un programa de conservación que incorporó la clonación como herramienta para recuperar diversidad genética perdida.

A partir de células criopreservadas desde 1988 –de la hembra Willa– nació en 2020 Elizabeth Ann, el primer clon de la especie. En 2024 se anunciaron nuevos clones (Noreen y Antonia) y, en 2025, se reportaron camadas descendientes de clones. Esta diversidad adicional puede traducirse en mayor salud y resistencia a enfermedades, y complementa, sin sustituir, las estrategias clásicas de conservación: cría en cautiverio, reintroducciones, manejo del hábitat y control de patógenos (USFWS, 2024).

Otros clones exitosos son Kurt (2020) y Ollie (2023), caballos de Przewalski (*Equus przewalskii*), obtenidos a partir de una línea celular criopreservada por más de 40 años en el Frozen Zoo del San Diego Zoo Wildlife Alliance. El objetivo de este procedimiento no fue multiplicar individuos, sino devolver variantes genéticas antiguas a una especie cuya población actual descende de muy pocos fundadores; por eso, estos potros –clonados con apoyo de Revive & Restore y ViaGen Pets & Equine– están destinados a integrarse a la reproducción del grupo de equinos en el San Diego Zoo Safari Park, para que su descendencia eleve la diversidad y la resiliencia de la especie (Novak *et al.*, 2025).

En el panda gigante (*Ailuropoda melanoleuca*), las TRA han sido claves para aprovechar una ventana fértil brevísima; los equipos de trabajo monitorean picos hormonales en orina o sangre para identificar la ovulación y programar IA cuando el apareamiento



© Malú Méndez Lavielle. *Inquietud*.

natural falla, manteniendo además bancos de semen y protocolos de manejo conductual para estimular la receptividad de la pareja; tras la fecundación, la incubación y el manejo neonatal han elevado drásticamente la supervivencia de crías en cautiverio; estas técnicas, junto a la mejora del hábitat en China, han contribuido a que la especie pasara de “en peligro” a “vulnerable” en la Lista Roja de la UICN (Huang *et al.*, 2021).

El caso del rinoceronte blanco del norte (*Ceratotherium simum cottoni*) muestra cómo las TRA pueden articularse en un protocolo completo. Con solo dos hembras, Najin y Fatu, y tras la muerte del último macho, Sudán, en 2018, el consorcio BioRescue estableció un flujo de trabajo en cuatro etapas: (1) obtención de ovocitos de Fatu por aspiración ovárica; (2) fecundación por ICSI con semen criopreservado de machos ya fallecidos; (3) cultivo y criopreservación de los embriones viables; y (4) transferencia a hembras receptoras de la especie rinoceronte blanco del sur (*Ceratotherium simum simum*) aptas para gestar. En 2024-2025 se

iniciaron transferencias de embriones de rinoceronte blanco del norte a hembras receptoras del sur. Hasta agosto de 2025 no se han reportado nacimientos, pero la ruta técnica está operativa y en perfeccionamiento continuo (Korody y Hildebrandt, 2025).

Finalmente, en México, uno de los países megadiversos del planeta, también se han implementado biobancos y manejo reproductivo con objetivos de conservación. La Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, a través de la Dirección General de Zoológicos y Conservación de la Fauna Silvestre, alberga el Laboratorio de Genómica de Conservación y Biobanco de Tejidos y Germoplasma, ubicado en el Zoológico de Chapultepec “Alfonso L. Herrera”, que resguarda más de mil muestras de especies amenazadas nativas de México como el borrego cimarrón, el lobo mexicano, el jaguar y de otras partes del mundo como el panda gigante, útiles para manejo, reproducción e investigación.

DESAFÍOS Y LIMITACIONES

Trabajar con TRA en conservación suena prometedor, pero tiene su complejidad. Cada especie tiene su ritmo biológico, y lo que funciona en grupos ya conocidos (ganado, roedores de laboratorio) puede fallar en felinos, anfibios u otros integrantes de la fauna silvestre. Además, mover, anestésiar o manipular a un animal silvestre puede alterarlo y, por ende, reducir el estrés al que se somete a la fauna silvestre mediante el uso de recintos amigables, buen trato a los especímenes y equipos silenciosos es parte del protocolo para garantizar el éxito reproductivo. Queda una pregunta ética en el aire: ¿hasta dónde intervenir con clonación, inseminación artificial o transferencias de embriones entre especies? Los científicos, autoridades y comunidades deberán reflexionar al respecto para garantizar el bienestar ambiental. Las TRA son un apoyo a la conservación, no una licencia para descuidar el hábitat. Sin territorios seguros y sin frenar la caza

furtiva o la deforestación, un nacimiento logrado en laboratorio difícilmente se traducirá en una población autosustentable.

CONCLUSIÓN: CONSERVAR VIDA ES CONSERVAR POSIBILIDADES

Las tecnologías reproductivas nos recuerdan que la conservación no es solo proteger espacios, sino también resguardar información biológica: genomas, rasgos, conductas. Cuando se aplican con base científica, criterios éticos claros y coordinación internacional, las TRA amplían el horizonte de opciones para especies en riesgo crítico. Pero la biotecnología no debe convertirse en coartada para aplazar decisiones difíciles sobre territorio, consumo y justicia ambiental. Un embrión generado en laboratorio vale en la medida en que puede crecer en un mundo con agua limpia, alimento y espacio. Por eso, el uso responsable de TRA va de la mano con la restauración de hábitats, combate a la caza furtiva, corredores biológicos y comunidades que conviven con la fauna. La biología de la reproducción aporta instrumentos poderosos; la ecología, el contexto donde esos instrumentos cobran sentido. Entre ambas disciplinas, y con ciudadanía informada, la conservación puede pasar de la resistencia a la resiliencia.

© Malú Méndez Lavielle. *My music.*





© Malú Méndez Lavielle. Azuleas.

REFERENCIAS

- Comizzoli P and Holt WV (2019). Breakthroughs and new horizons in reproductive biology of rare and endangered animal species. *Biology of Reproduction* 101(3):514-525. DOI: <https://doi.org/10.1093/biolre/foz031>.
- Huang G, Ping X, Xu W *et al.* (2021). Wildlife conservation and management in China: achievements, challenges and perspectives. *National Science Review* 8(7):nwab042. DOI: <https://doi.org/10.1093/nsr/nwab042>.
- Korody ML and Hildebrandt TB (2025). Progress Toward Genetic Rescue of the Northern White Rhinoceros (*Ceratotherium simum cottoni*). *Annual Review of Animal Biosciences* 13(1):483-505. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-animal-111523-102158>.
- Mastromonaco G (2024). 40 'wild' years: the current reality and future potential of assisted reproductive technologies in wildlife species. *Animal Reproduction* 21(3):e20240049. DOI: <https://doi.org/10.1590/1984-3143-AR2024-0049>.
- Martin-Wintle MS, Kersey DC, Wintle NJP *et al.* (2019). Comprehensive breeding techniques for the giant panda. *Advances in Experimental Medicine and Biology* 1200:275-308. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-23633-5_10.
- Mooney A, Ryder OA, Houck ML *et al.* (2023). Maximizing the potential for living cell banks to contribute to global conservation priorities. *Zoo Biology* 42(6):697-708. DOI: <https://doi.org/10.1002/zoo.21787>.
- Novak BJ, Ryder OA, Houck ML *et al.* (2025). Endangered Przewalski's Horse, *Equus przewalskii*, cloned from historically cryopreserved cells. *Animals* 15(5):613. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani15050613>.
- Sala OE, Chapin FS 3rd, Armesto JJ *et al.* (2000). Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science* (New York, N.Y.) 287(5459):1770-1774. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.287.5459.1770>.
- Székely T (2023). Evolution of reproductive strategies: sex roles, sex ratios and phylogenies. *Biologia Futura* 74(4):351-357. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42977-023-00177-0>.
- USFWS Advancements for Black-footed Ferret Conservation Continue with New Offspring from Cloned Ferret. Press Release 2024. Revisado el 1 de noviembre de 2024. Disponible en línea: <https://www.fws.gov/press-release/2024-11/advancements-black-footed-ferret-conservation-continue-new-offspring-cloned>.

Angélica Trujillo Hernández
Centro de Química
Instituto de Ciencias
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
angelica.trujillo@correo.buap.mx

© Malú Méndez Lavielle. *Barrial.*



Diagnóstico sin dolor: termografía médica con inteligencia artificial

Francisco Jacob **Ávila Camacho**
María de la Luz **Delgadillo Torres**

El cuerpo humano emite calor de manera constante, aunque no lo notemos. Cada órgano, cada músculo y cada vaso sanguíneo produce pequeñas variaciones de temperatura que reflejan su funcionamiento (Ahalya *et al.*, 2023). La termografía médica utiliza cámaras infrarrojas de alta sensibilidad para convertir esas variaciones térmicas en imágenes a color llamadas termogramas (Bi *et al.*, 2019). En ellas, las zonas con mayor flujo sanguíneo, como inflamaciones o tejidos en crecimiento, aparecen más calientes, mientras que otras se muestran frías. Es, en pocas palabras, una fotografía del calor del cuerpo (Morales-Ivorra *et al.*, 2022).

Lo que para nosotros es invisible, para la termografía resulta evidente. Un tumor en desarrollo, por ejemplo, necesita más sangre para crecer; esa irrigación extra genera calor y la cámara lo registra. Lo mismo ocurre con la inflamación de una articulación en casos de artritis o con problemas en la circulación sanguínea de las extremidades (Pauk *et al.*, 2019). En determinados contextos clínicos y bajo condiciones controladas, la termografía puede contribuir a la detección temprana de alteraciones fisiológicas que deben confirmarse con otros estudios.



© Malú Méndez Lavielle. *Visión*.

Aunque esta técnica ha sido estudiada durante décadas, su uso clínico permanece limitado. En países como México y América Latina, la termografía continúa empleándose principalmente en contextos de investigación o como método complementario, ya que aún no existe regulación amplia ni validación clínica suficiente que respalde su implementación rutinaria.

Algunas alteraciones fisiológicas producen incrementos localizados de calor, como ocurre en procesos inflamatorios o en articulaciones afectadas por artritis. En determinadas condiciones, la termografía puede ayudar a identificar estos cambios en etapas tempranas. Sin embargo, su utilidad depende de factores como la profundidad del tejido afectado, la variabilidad térmica de cada individuo y la precisión con la que se capturen y procesen las imágenes.

En patologías complejas como el cáncer de mama, la termografía no sustituye a estudios convencionales, ni está aprobada como técnica de tamizaje. Investigaciones recientes exploran su uso como método complementario o preliminar, pero su sensibilidad y especificidad continúan siendo variables y requieren validación clínica más amplia (Kakileti *et al.*, 2020).

LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL ENTRA EN JUEGO

Tradicionalmente, la interpretación de un termograma dependía del criterio del especialista. Sin embargo, los patrones térmicos no siempre son evidentes, y pequeñas variaciones pueden pasar desapercibidas. En este contexto, la inteligencia artificial (IA) ha abierto nuevas posibilidades. Los modelos de aprendizaje automático pueden analizar miles de imágenes térmicas para identificar características asociadas con inflamación, daño articular o irregularidades térmicas. (Schiavon *et al.*, 2022).

No obstante, el uso de IA implica desafíos importantes. Los algoritmos pueden presentar sesgos derivados de bases de datos limitadas, sobreajustes cuando aprenden patrones que no generalizan adecuadamente, y falta de interpretabilidad cuando operan como “cajas negras”. Además, su desempeño depende estrictamente de que las imágenes sean capturadas bajo condiciones ambientales controladas, lo cual constituye un reto para su adopción clínica (Omranipour *et al.*, 2016).

VENTAJAS FRENTE A LOS MÉTODOS TRADICIONALES

La termografía destaca por ser no invasiva, indolora y libre de radiación. Estas características la vuelven atractiva para ciertas aplicaciones de investigación, monitoreo o seguimiento. Sin embargo, su simplicidad técnica no debe confundirse con una precisión automática. La calidad del termograma depende de variables como la temperatura ambiente, la humedad, el tiempo de aclimatación del paciente y la calibración del equipo (Khan *et al.*, 2021).

A pesar de su potencial, como se mencionó anteriormente no está aprobada como método de tamizaje rutinario en la mayoría de los sistemas de salud internacionales ni en México. Su rol actual es complementario y se circunscribe principalmente a investigación o apoyo clínico exploratorio (Kontos *et al.*, 2011).

Por supuesto, la termografía con inteligencia artificial no está exenta de desafíos. Los especialistas señalan la necesidad de estandarizar protocolos de captura para garantizar la calidad de las

imágenes, así como entrenar a los profesionales de la salud en su correcta interpretación. También persisten preguntas sobre la fiabilidad de los algoritmos: ¿cómo asegurarnos de que un “diagnóstico automático” sea transparente y confiable? Resolver estas dudas será clave para que la termografía gane un lugar junto a las técnicas de diagnóstico tradicionales.

EL FUTURO DE LA MEDICINA PREVENTIVA (CON CAUTELA)

Algunos grupos de investigación plantean escenarios en los que cámaras portátiles combinadas con IA podrían emplearse en clínicas rurales, hospitales o unidades móviles para evaluaciones preliminares. Si bien estos desarrollos muestran potencial, su adopción dependerá de superar retos técnicos, regulatorios y científicos: validar la reproducibilidad de

los resultados, estandarizar protocolos de captura y asegurar la transparencia de los modelos de IA.

En América Latina, donde la disponibilidad tecnológica puede ser desigual, la termografía podría convertirse en una herramienta accesible para ciertos contextos, siempre y cuando sea utilizada como complemento y no como sustituto de estudios diagnósticos establecidos.

CONCLUSIONES

La termografía médica con inteligencia artificial representa un campo de investigación en expansión. Sus ventajas (no invasión, rapidez y ausencia de radiación) la vuelven atractiva para ciertos estudios, en especial aquellos relacionados con procesos inflamatorios superficiales. Sin embargo, su incorporación en la práctica clínica depende de superar limitaciones metodológicas, validar



su eficacia en poblaciones diversas y establecer protocolos estandarizados.

Más que una solución definitiva, la termografía es un ejemplo de cómo la tecnología puede abrir nuevas preguntas y herramientas para la medicina preventiva. Su desarrollo futuro requerirá equilibrar entusiasmo tecnológico con rigor científico.

R E F E R E N C I A S

Ahalya RK, Almutairi FM, Snehalatha U *et al.* (2023). RANet: A custom CNN model and quanvolutional neural network for the automated detection of rheumatoid arthritis in hand thermal images. *Scientific Reports* 13(1):15638.

Bi WL, Hosny A, Schabath MB *et al.* (2019). Artificial intelligence in cancer imaging: Clinical challenges and applications. *CA: A Cancer Journal for Clinicians* 69(2):127-157.

Kakileti ST, Madhu HJ, Krishnan L *et al.* (2020). Clinical efficacy of Thermalytix for breast cancer detection. *JCO Global Oncology* 6:1472-1480.

Khan AA and Arora AS (2021). Thermography as an economical alternative to mammography. *Journal of Healthcare Engineering* 2021 (6):5543101.

Kontos M, Wilson R and Fentiman I (2011). Digital infrared thermal imaging of breast lesions. *Clinical Radiology* 66(6):536-539.

Morales-Ivorra I, Narváez J, Moreno M *et al.* (2022). Assessment of inflammation with hand thermography and machine learning. *RMD Open* 8(2):e002458.

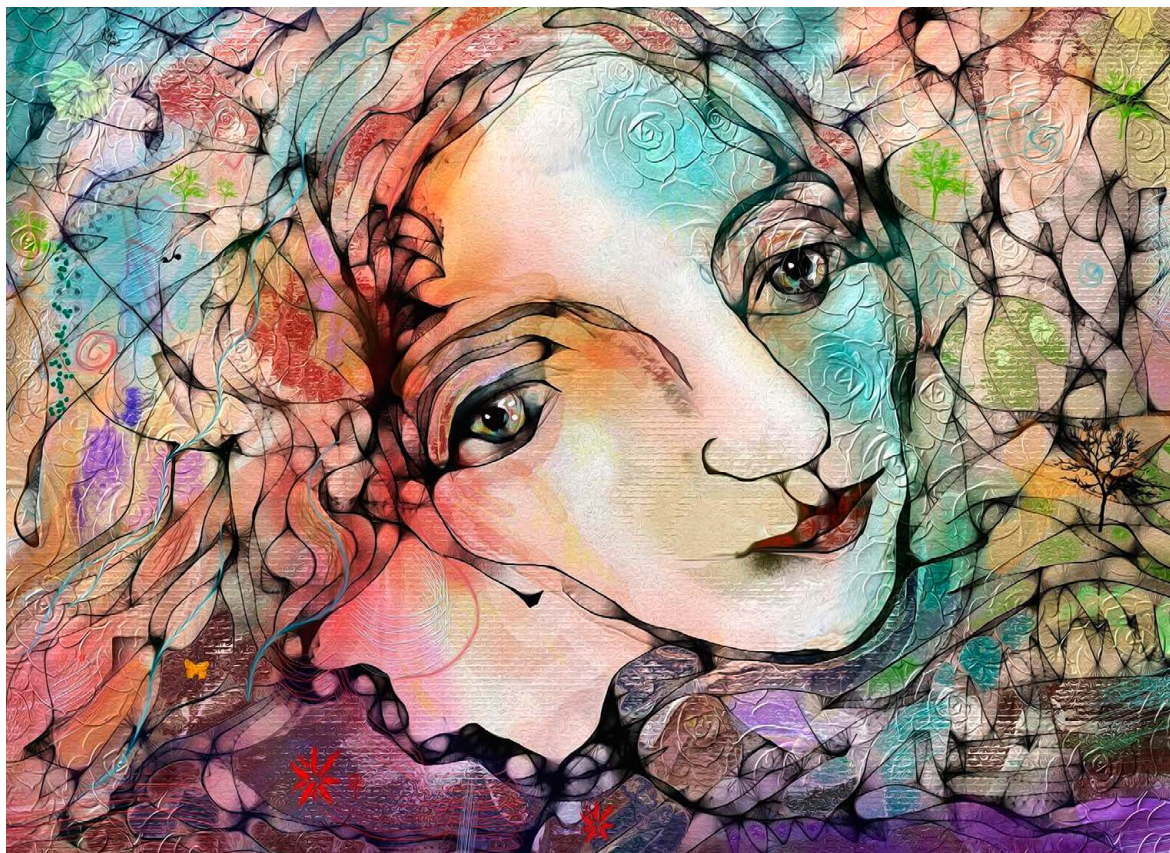
Omranipour R, Kazemian A and Alipour S (2016). Accuracy of thermography vs mammography. *Breast Care* 11(4):260-264.

Pauk J, Wasilewska A and Ihnatouski M (2019). Infrared thermography for disease activity detection in rheumatoid arthritis. *Sensors* 19(16):3444.

Schiavon G, Carrara G, Bortoluzzi A *et al.* (2021). Infrared thermography in rheumatic diseases: A systematic review. *Sensors* 21(2):512.

Francisco Jacob Ávila Camacho
División de Ingeniería en Sistemas Computacionales
Tecnológico Nacional de México
Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec
fjacobavila@tese.edu.mx

María de la Luz Delgadillo Torres
División de Ingeniería Química y Bioquímica
Tecnológico Nacional de México
Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec



Los triterpenos como aliados en la lucha contra el cáncer

Giovanny **Aguilera-Durán**
Ma del Refugio **Cuevas-Flores**

El cáncer es una de las enfermedades con mayor incidencia y mortalidad a nivel mundial. En 2018 se reportaron aproximadamente 18.1 millones de nuevos casos y 9.5 millones de muertes, situándose como la segunda causa de defunción global después de las enfermedades cardiovasculares (Malekinejad *et al.*, 2022). En esta enfermedad, las células normales pierden la capacidad de controlar su división celular, generando problemas en la salud de los pacientes. Existen diferentes tipos de cáncer, pero algunos destacan por su agresividad. Entre los más relevantes se encuentran el cáncer de pulmón, mama, cervicouterino, colorrectal y el melanoma, siendo este último uno de los de peor pronóstico. La alta incidencia, su elevada mortalidad y la complejidad de los mecanismos que permiten a las células tumorales evadir la apoptosis, un mecanismo de la propia célula para destruirse de manera controlada cuando hay daño o errores, y desarrollar resistencia terapéutica hacen del cáncer uno de los principales retos de la medicina contemporánea.

Dentro de este panorama, el cáncer de pulmón de células no pequeñas (NSCLC, por sus siglas en inglés *Non-Small Cell Lung Cancer*) constituye aproximadamente el 85 % de los casos diagnosticados de cáncer pulmonar. Se trata de la forma más prevalente de esta enfermedad y presenta una tasa de supervivencia a 5 años de apenas 8 % en la etapa III y 2 % en la etapa IV.

El tratamiento para el cáncer suele concentrarse en quimioterapia y radioterapia y, dependiendo del tipo de cáncer se necesitan diferentes concentraciones del tratamiento. En el cáncer de pulmón, a pesar de los avances en quimioterapia, como el desarrollo de inhibidores de tirosina cinasa (TKI, por sus siglas en inglés) e inmunoterapia, la mayoría de los pacientes presenta resistencia a los tratamientos, lo que limita su eficacia clínica y favorece la progresión tumoral y metástasis, que es el resultado de la migración de células tumorales a diferentes tejidos del cuerpo (Ko *et al.*, 2018).

Por otro lado, el cáncer de mama es la principal causa de muerte en mujeres, con una prevalencia de 24.2 % y una mortalidad cercana al 15 % a escala mundial (Malekinejad *et al.*, 2022). Este tipo de cáncer se puede clasificar en tres tipos principales debido a la presencia de receptores (proteínas presentes dentro de la célula) en las células cancerígenas, que son aprovechados por las células para dividirse y sobrevivir, pero que en el diagnóstico nos permite identificar el tipo de cáncer y proponer tratamientos dirigidos:

1. Cáncer de mama dependiente de estrógenos o progesterona y negativo para HER-2, que corresponde a cerca del 70 % de los casos.
2. Cáncer de mama positivo para HER-2, presente en 15-20 % de los pacientes.
3. Cáncer de mama triple negativo (TNBC, por sus siglas en inglés Triple-Negative Breast Cancer), que carece de los tres marcadores principales (receptores hormonales y HER-2) y representa alrededor del 15 % de los casos (Malekinejad *et al.*, 2022).

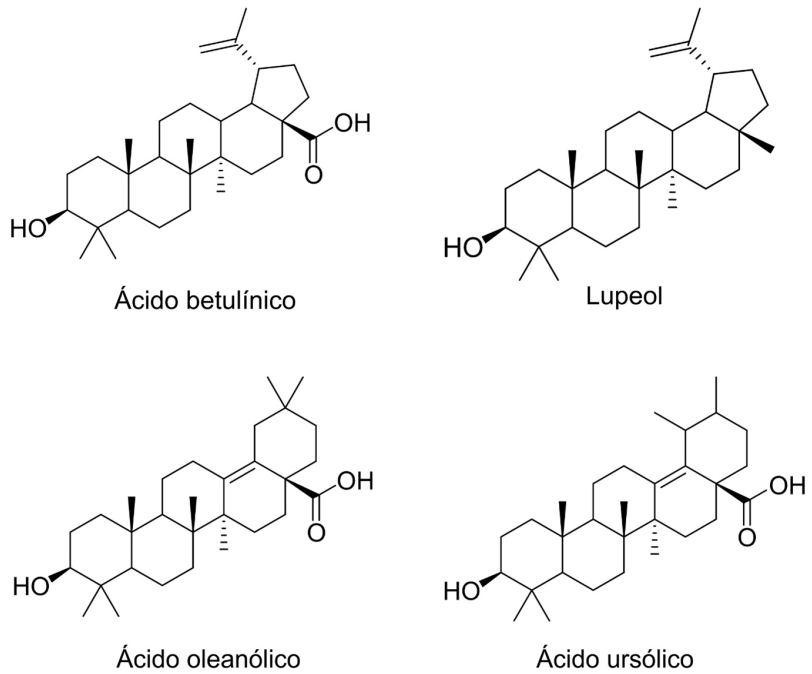


Figura 1. Estructura de algunos triterpenos pentacíclicos con actividad anticancerígena.

El TNBC es especialmente complicado de tratar, pues al no expresar alguna de las proteínas antes mencionadas, dificulta un tratamiento dirigido y eficaz. Esto deja a la quimioterapia no dirigida como la única opción viable, con el consiguiente impacto negativo en la supervivencia del paciente (Guerra *et al.*, 2020).

Tanto en cáncer de pulmón como en cáncer de mama, existen ciertas vías de señalización, una red de comunicaciones que se activa como una cascada cuando se activa la proteína inicial (puede ser un receptor de membrana o citosólico) se promoverá la participación de otras proteínas que derivarán en la expresión de genes y síntesis de proteínas, que son activadas por diversos ligandos (moléculas pequeñas o proteínas) promoviendo la proliferación de las células cancerígenas, metástasis e inhibición de la actividad del sistema inmune. Entre las vías de señalización que se sobreactivan en estos dos cánceres, está la vía del receptor al factor de crecimiento epitelial (EGFR) promoviendo proliferación y metástasis. Inhibir estas vías de señalización ha permitido el estudio de nuevas moléculas que puedan ser de utilidad en el tratamiento del cáncer, un ejemplo de esto son los triterpenos.

TRITERPENOS PENTACÍCLICOS COMO ALTERNATIVA TERAPÉUTICA

La búsqueda de nuevas moléculas que contribuyan al tratamiento del cáncer de pulmón y de mama es prioritaria para mejorar la supervivencia y calidad de vida de los pacientes. En este contexto, los productos naturales han emergido como una fuente de compuestos bioactivos con propiedades anticancerígenas. Entre ellos, los triterpenos han cobrado creciente interés por su capacidad de modular múltiples vías de señalización asociadas a proliferación, apoptosis, inflamación y metástasis.

Los triterpenos son metabolitos secundarios de origen vegetal, derivados del escualeno, cuya estructura química se compone de seis unidades de isopreno, formando un esqueleto de 30 carbonos. Los triterpenos pentacíclicos, caracterizados por la presencia de cinco anillos en su estructura, destacan por su versatilidad biológica. Su núcleo estructural les permite interactuar con diversas proteínas y desplegar actividades antiinflamatorias, antidiabéticas, antioxidantes, antivirales, hepatoprotectoras y anti-tumorales (Furtado *et al.*, 2017). Algunos de los más relevantes se muestran en la Figura 1.

EVIDENCIA RECIENTE DE ACTIVIDAD ANTICANCERÍGENA

Diversos estudios han documentado la acción de los triterpenos en distintos modelos de cáncer. Por ejemplo:

- El ácido betulínico ha sido reportado como modulador de la apoptosis en células de cáncer de pulmón resistentes a inhibidores de EGFR, promoviendo la activación de caspasas (proteínas relacionadas con la apoptosis) y la inhibición de proteínas antiapoptóticas (Ko *et al.*, 2018).
- El lupeol ha mostrado la capacidad de suprimir la actividad de EGFR y STAT3 (proteína que participa en la vía de señalización del EGFR), lo que conduce a la inhibición del crecimiento celular y a la inducción de apoptosis en células de cáncer de pulmón de células no pequeñas (Min *et al.*, 2019). Adicionalmente, el lupeol potencia la acción de la doxorubicina, fármaco intercalante del ADN, en

células de cáncer de mama, lo que indica que este tipo de combinaciones podría explorarse también en cáncer de pulmón como estrategia para mejorar la eficacia y reducir la resistencia a la quimioterapia (Malekinejad, 2022).

- Finalmente, tanto el ácido betulínico como el ácido ursólico han demostrado actividad antiproliferativa en células de cáncer de mama triple negativo, sin afectar a células normales (Guerra *et al.*, 2020).

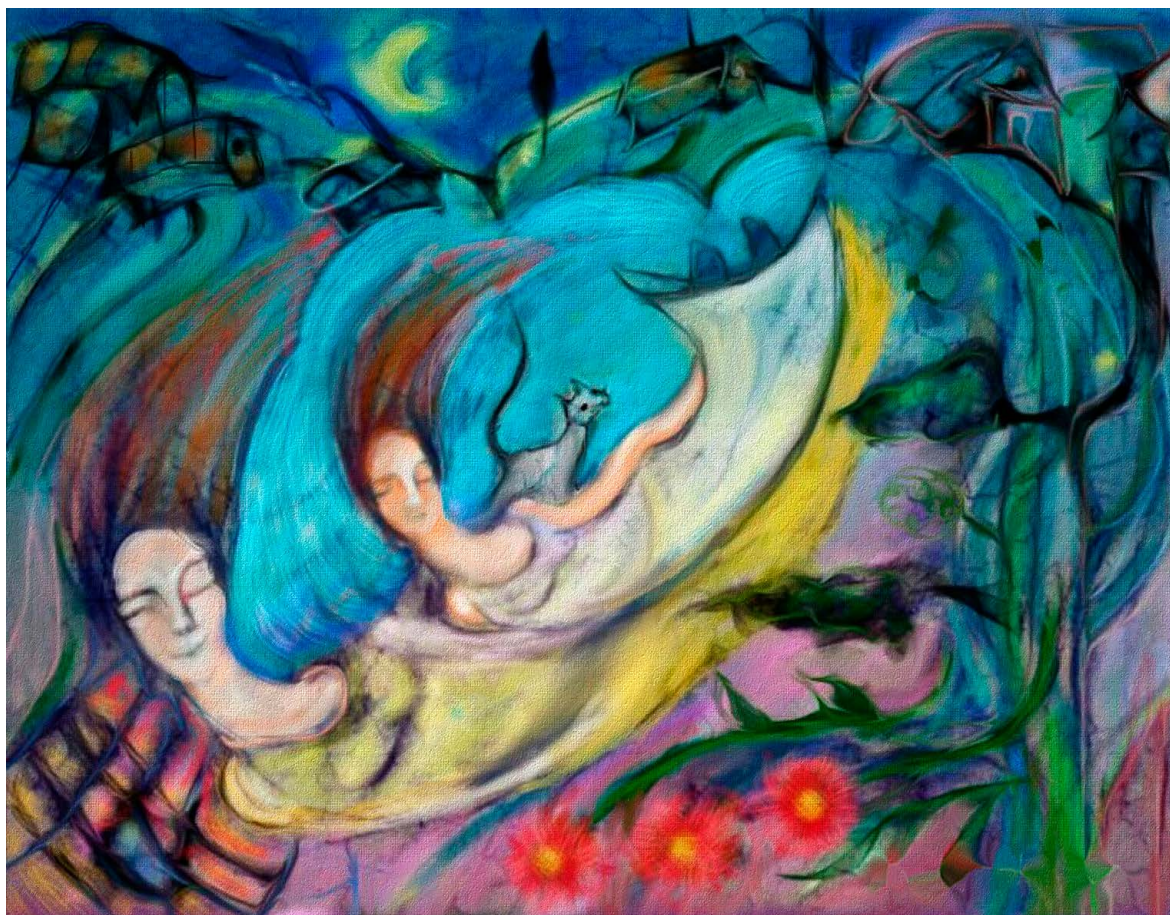
Estos datos sugieren que los triterpenos pueden intervenir directamente en mecanismos moleculares clave en la resistencia farmacológica y la progresión tumoral.

Aunque estas estructuras de origen vegetal sean prometedoras, es necesario reconocer que presentan algunas limitaciones: por su estructura química tan grande e hidrofóbica, son poco solubles en agua (prefieren aglomerarse que disolverse en agua), su extracción y purificación de las plantas que los contienen suele ser complicada, lo que eleva costos para la adquisición de estos compuestos. Sin embargo, su potencial se ha explorado en diversos estudios y las modificaciones estructurales que pueden tener se han ampliado a lo largo de los años.

CONCLUSIÓN

El cáncer es una de las principales causas de mortalidad en el mundo, en donde la resistencia terapéutica se presenta como un obstáculo necesario a superar. Los triterpenos se perfilan como compuestos de gran interés gracias a su capacidad de intervenir en vías de señalización necesarias para la proliferación y metástasis de las células cancerígenas como la vía de señalización de EGFR.

Los estudios sobre estas estructuras demuestran la versatilidad para actuar como tratamiento individual o integrarse en estrategias combinadas de tratamiento, pero es necesario profundizar en estudios experimentales que permitan establecer la eficacia y seguridad de estas estructuras, ya que los principales problemas que presentan son la poca solubilidad en agua y dificultad de obtención



© Malú Méndez Lavielle. *Vuelo nocturno*.

y purificación. Sin embargo, la versatilidad farmacológica y la riqueza estructural de su núcleo pentacíclico convierten a los triterpenos en un punto de partida relevante para la optimización estructural y el diseño de nuevas moléculas bioactivas orientadas al tratamiento del cáncer.

REFERENCIAS

Furtado NAJC, Pirson L, Edelberg H *et al.* (2017). Pentacyclic triterpene bioavailability: An overview of in vitro and in vivo studies. *Molecules* 22(3):400. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules22030400>.

Guerra ÁR, Paulino AF, Castro MM *et al.* (2020). Triple negative breast cancer and breast epithelial cells differentially reprogram glucose and lipid metabolism upon treatment with triterpenic acids. *Biomolecules* 10:1163. DOI: <https://doi.org/10.3390/biom10081163>.

Ko JL, Lin CH, Chen HC *et al.* (2018). Effects and mechanisms of betulinic acid on improving EGFR TKI-resistance of lung cancer cells. *Environmental Toxicology* 33:1039-1045. DOI: <https://doi.org/10.1002/tox.22621>.

Malekinejad F, Kheradmand F, Khadem-Ansari MH and Malekinejad H (2022). Lupeol synergizes with doxorubicin to induce anti-proliferative and apoptotic effects on breast cancer cells. *DARU Journal of Pharmaceutical Sciences* 30:103-115. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40199-022-00436-w>.

Min TR, Park HJ, Ha KT *et al.* (2019). Suppression of EGFR/STAT3 activity by lupeol contributes to the induction of the apoptosis of human non-small cell lung cancer cells. *International Journal of Oncology* 55:320-330. DOI: <https://doi.org/10.3892/ijo.2019.4799>.

Odarenko KV, Zenkova MA and Markov AV (2023). The nexus of inflammation-induced epithelial-mesenchymal transition and lung cancer progression: A roadmap to pentacyclic triterpenoid-based therapies. *International Journal of Molecular Sciences* 24:17325. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms242417325>.

Giovanny Aguilera-Durán
Unidad Académica de Ciencias Químicas
Universidad Autónoma de Zacatecas
giovanny.aguilera@uaz.edu.mx

Ma del Refugio Cuevas-Flores
Unidad Académica de Ciencias Químicas
Universidad Autónoma de Zacatecas

Triquinosis: una enfermedad difícil de erradicar

Nancy Edith **Rodríguez Garza**

Desde tiempos remotos, los seres humanos han estado expuestos a parásitos transmitidos por los alimentos, siendo *Trichinella spiralis* uno de los más antiguos y persistentes. Este diminuto gusano es el causante de la triquinosis, una enfermedad que aún representa un riesgo para la salud, especialmente en lugares donde se consume carne cruda o poco cocida, ya sea de origen silvestre o sin la inspección sanitaria adecuada.

Según datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS), cada año se registran aproximadamente 10,000 nuevas infecciones a nivel mundial (Organización Mundial de la Salud, 2021), lo cual subraya la importancia de conocer esta enfermedad, sus formas de transmisión y cómo prevenirla. En las siguientes secciones, exploraremos estos temas.

¿QUÉ ES LA TRIQUINOSIS Y EN QUÉ ANIMALES SE ENCUENTRA?

La triquinosis, también conocida como triquinelosis, es una enfermedad parasitaria que se transmite de los animales a los humanos. Es causada por varios parásitos del género *Trichinella*, siendo *Trichinella spiralis* la especie más común en humanos y la más relevante desde el punto de vista clínico y epidemiológico. Este parásito vive en el tejido muscular de una amplia gama de animales silvestres y domésticos. Las personas se infectan al consumir carne

que contiene las larvas y que no ha sido cocinada adecuadamente (Malone *et al.*, 2024).

En el pasado, la mayoría de los casos de triquinosis en humanos estaban vinculados al consumo de carne de cerdos domésticos infectados. En la década de 1930, casi 1 de cada 6 personas examinadas en los Estados Unidos tenía larvas de este parásito en su musculatura debido al consumo de cerdo infectado. No obstante, gracias a las mejoras en bioseguridad y control sanitario, la incidencia en carne de cerdo ha disminuido notablemente. Actualmente, los casos humanos están

más asociados al consumo de carne de animales silvestres como jabalíes, osos, zorros, armadillos, caballos e incluso morsas. *Trichinella spiralis* puede infectar a más de 100 especies de vertebrados, tanto carnívoros como omnívoros, convirtiéndose en un riesgo de infección si se consumen crudos o poco cocidos (Malone *et al.*, 2024).

En cuanto a su morfología, *Trichinella spiralis* es uno de los nematodos (gusanos redondos) más pequeños que afectan al ser humano; las hembras adultas miden entre 2 y 4 mm, mientras que los machos alcanzan entre 1 y 1.5 mm. Los adultos se alojan temporalmente en el intestino delgado del hospedador, donde las hembras producen entre 1,500 y 3,000 larvas (Figura 1). Posteriormente, estas larvas migran a través del torrente sanguíneo hasta el músculo, donde se enquistan (Figura 2). Cada quiste contiene una larva enrollada en espiral, lo que explica el nombre del parásito (Yadesa *et al.*, 2020).

UN HALLAZGO ACCIDENTAL:

LA HISTORIA DEL DESCUBRIMIENTO

En febrero de 1835, el joven estudiante de medicina James Paget se encontraba en el hospital St.



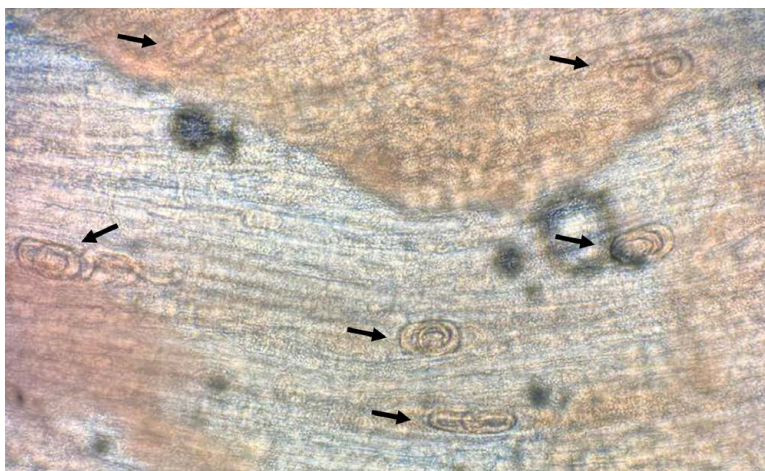
Figura 1. Larvas de *Trichinella spiralis* desenquistadas.

Bartholomew de Londres realizando la autopsia de un hombre de 40 años fallecido por tuberculosis. Durante el procedimiento, notó que el cadáver presentaba un gran número de puntos blanquecinos que parecían contener algo en su interior. Al no contar con los instrumentos adecuados para examinarlos, envió una muestra a Richard Owen, quien determinó que se trataba de pequeños gusanos y les dio el nombre *Trichinella spiralis*. Owen publicó sus hallazgos, lo que le valió el crédito del descubrimiento (Pozio y Gomez Morales, 2023).

Más adelante, en 1859, Rudolf Virchow describió el ciclo de vida del parásito, y en 1860 Friedrich Zenker demostró su patogenicidad en humanos. Ese mismo año se documentó por primera vez la muerte de una persona por triquinosis, tras hallarse una gran cantidad de larvas en sus músculos e intestinos (Gaeta y Bruschi, 2021).

En los años posteriores, se registró un creciente número de casos y muertes asociados a este parásito, lo que llevó a que se le diera la importancia que merecía. Finalmente, en 1895, Alcide Raillet propuso cambiar el nombre del género *Trichina* a *Trichinella*, denominándose desde entonces al parásito como *Trichinella spiralis* (Pozio y Gomez Morales, 2023).

Figura 2. Larvas de *Trichinella spiralis* enquistadas en lengua de jabalí. Las flechas indican la ubicación de las larvas.



Aunque su descubrimiento científico es relativamente reciente, la triquinosis es tan antigua como la relación del ser humano con el consumo de carne. En 1974 se detectaron larvas del parásito en una momia egipcia de alrededor de 1200 a.C., y desde entonces se han encontrado restos en otras momias y restos arqueológicos en España, Estados Unidos y Chile, lo que sugiere que esta infección ha acompañado a la humanidad desde tiempos prehistóricos (Gaeta y Bruschi, 2021).

de contagio. La crianza de cerdos en espacios con poca supervisión sanitaria y la presencia de animales silvestres que también pueden portar el parásito ayudan a que continúe circulando en el entorno (Figura 3) (Malone *et al.*, 2024).

A nivel mundial, se estima que la triquinosis alcanzó su mayor incidencia en las décadas de 1970 y 1980, cuando se registraron hasta 11 millones de casos anuales. Sin embargo, en la actualidad, la incidencia ha disminuido significativamente, con

DISTRIBUCIÓN Y SITUACIÓN EN MÉXICO

Aunque este parásito puede encontrarse en casi todo el mundo, es más común en las regiones templadas. En estos lugares, el clima favorece que las larvas sobrevivan por más tiempo en el ambiente o en restos de carne, lo que facilita su propagación. Además, algunas costumbres, como consumir carne de cerdo poco cocida o preparar embutidos de forma casera, aumentan el riesgo

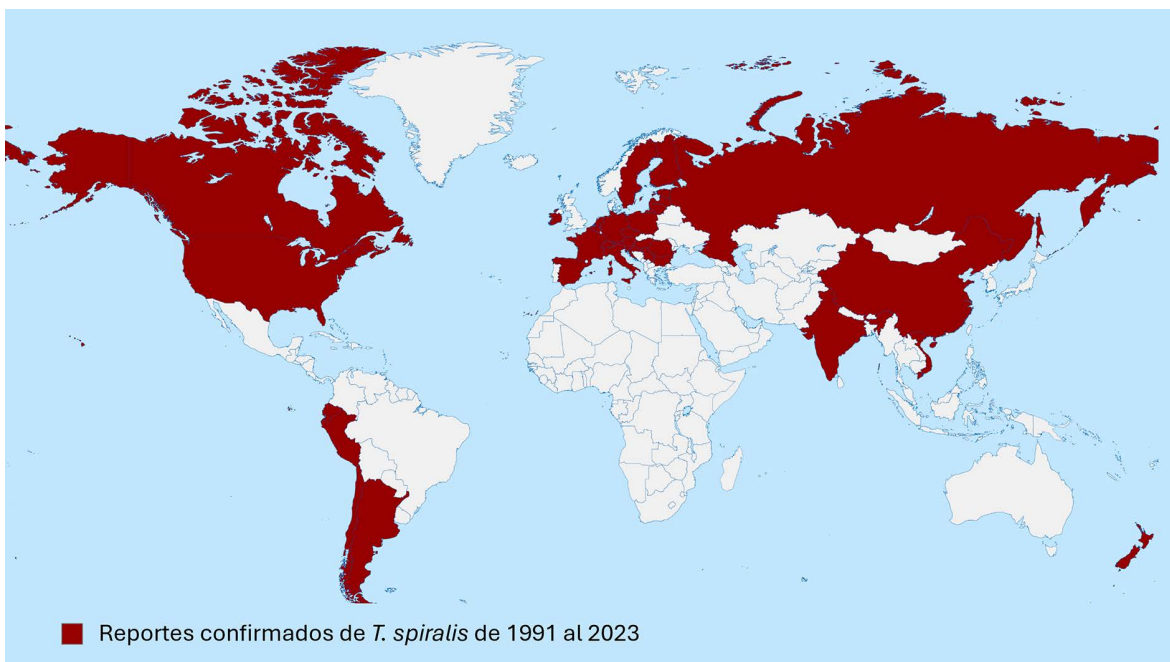


Figura 3. Países donde hubo casos confirmados de *Trichinella spiralis* de 1991 a 2023. Imagen realizada en MapChart.

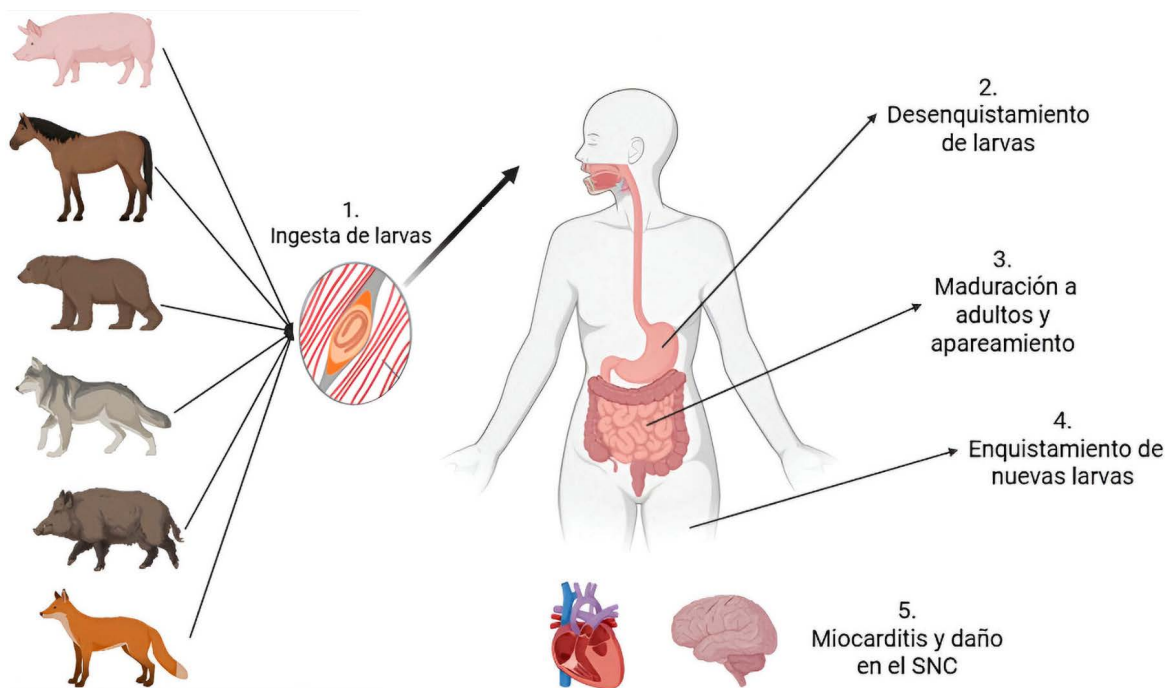


Figura 4. Ciclo biológico de *Trichinella spiralis*. Imagen realizada en BioRender.

aproximadamente 10,000 casos reportados anualmente (Organización Mundial de la Salud, 2021).

En México, la triquinosis tuvo su mayor incidencia a finales de la década de 1980, cuando la enfermedad era bastante común en varias regiones del país. En 1990 se registraron 238 casos, un número elevado que reflejaba los riesgos asociados al consumo de carne de cerdo o jabalí mal cocida, sobre todo en comunidades donde se mantienen prácticas tradicionales. Desde entonces, los casos han disminuido notablemente, con un promedio de alrededor de 15 casos por año entre 2013 y 2024, pero nunca ha habido un año sin registros, lo que muestra que la enfermedad sigue siendo un riesgo de salud pública. Según el Boletín Epidemiológico de 2024, se notificaron 18 casos en todo el país, concentrándose principalmente en la Ciudad de México (5 casos), Veracruz (3 casos) y Sinaloa (2 casos). Sin embargo, se estima que la cifra real es mayor, ya que muchos casos no se reportan, especialmente en zonas rurales con acceso limitado a servicios de salud (Secretaría de Salud, 2024).

CICLO DE VIDA Y FASES DE LA ENFERMEDAD

La infección se adquiere al ingerir carne con larvas enquistadas de *Trichinella spiralis*. En el estómago, los quistes se disuelven y liberan larvas que penetran la mucosa intestinal. En menos de dos días se transforman en adultos y se reproducen. Las nuevas larvas atraviesan los vasos linfáticos y sanguíneos hasta alcanzar el músculo esquelético, donde se enquistan en un lapso de tres meses. Estos quistes pueden calcificarse, pero las larvas pueden permanecer viables hasta 40 años (Figura 4) (Pavel *et al.*, 2023).

Se estima que solo se requiere la ingestión de entre 70 y 150 larvas para causar una infección. Una vez adquirido el parásito, la enfermedad presenta dos fases:

1. Fase intestinal (1 a 2 días tras la ingestión): puede causar dolor abdominal, diarrea, vómitos y náuseas.
2. Fase muscular (a partir del día 5 tras la ingestión): las larvas migran al músculo y provocan inflamación, fiebre, dolor muscular, edema facial y eosinofilia. En casos graves, puede haber complicaciones cardíacas (miocarditis), neurológicas (encefalitis,

meningitis), respiratorias y oculares. En los casos más graves, una persona puede llegar a albergar más de 100 millones de larvas del parásito en su cuerpo, lo que intensifica los síntomas y provoca secuelas a largo plazo (Ramírez, 1981). La mortalidad puede alcanzar el 5.6 % (Poizio y Gomez Morales, 2023).

Cuando las hembras dejan de producir larvas (6 a 8 semanas después de la infección), se entra en una fase crónica. Algunos pacientes mejoran, pero otros presentan síntomas persistentes durante meses o incluso años, incluyendo debilidad muscular, sudoración, conjuntivitis y fatiga prolongada (Ramírez, 1981).

DIAGNÓSTICO

La sospecha de triquinosis se basa en la historia clínica del paciente, los síntomas y la presencia de eosinofilia. Para confirmarla, se pueden realizar pruebas diagnósticas específicas, entre las que destaca la detección de anticuerpos específicos contra el parásito, siendo el ensayo inmunoabsorbente ligado a enzimas (ELISA) el más utilizado. También se puede realizar una biopsia muscular, comúnmente del músculo deltoides (hombro) o gastrocnemio (pantorrilla), que permite identificar las larvas enquistadas en el tejido muscular. Esta prueba es inequívoca para confirmar la infección y, además, ayuda a estimar su nivel mediante el cálculo del número de larvas por gramo de tejido (Dupouy-Camet *et al.*, 2021).

TRATAMIENTO

El tratamiento de la triquinosis incluye medicamentos antiparasitarios para combatir al parásito y esteroides para reducir los síntomas de la enfermedad. Los antiparasitarios más utilizados son albendazol y mebendazol, los cuales son muy efectivos para eliminar los parásitos adultos en el intestino. Sin embargo, estos medicamentos tienen poco o ningún efecto sobre las larvas enquistadas en el tejido muscular. Por lo tanto, una vez que las larvas invaden el músculo, no existe un tratamiento eficaz para eliminarlas (El-Wakil *et al.*, 2023), por lo que la prevención es clave para evitar la infección.

PREVENCIÓN: LA CLAVE ESTÁ EN LA COCCIÓN

Las larvas de *Trichinella* son extremadamente resistentes y su supervivencia puede variar según la especie del parásito y el tipo de carne en que se encuentren. Por ejemplo, pueden sobrevivir hasta tres meses en carne en descomposición a temperatura ambiente y resistir la refrigeración. Aunque la congelación puede ser efectiva, su eficacia depende tanto de la especie de *Trichinella* como del tipo de carne y del tiempo de exposición; por ejemplo, en carne de caballo algunas larvas pueden sobrevivir hasta cuatro semanas a -18 °C (Malone *et al.*, 2024).

La forma más segura de eliminar el parásito es la cocción completa de la carne. Se recomienda:

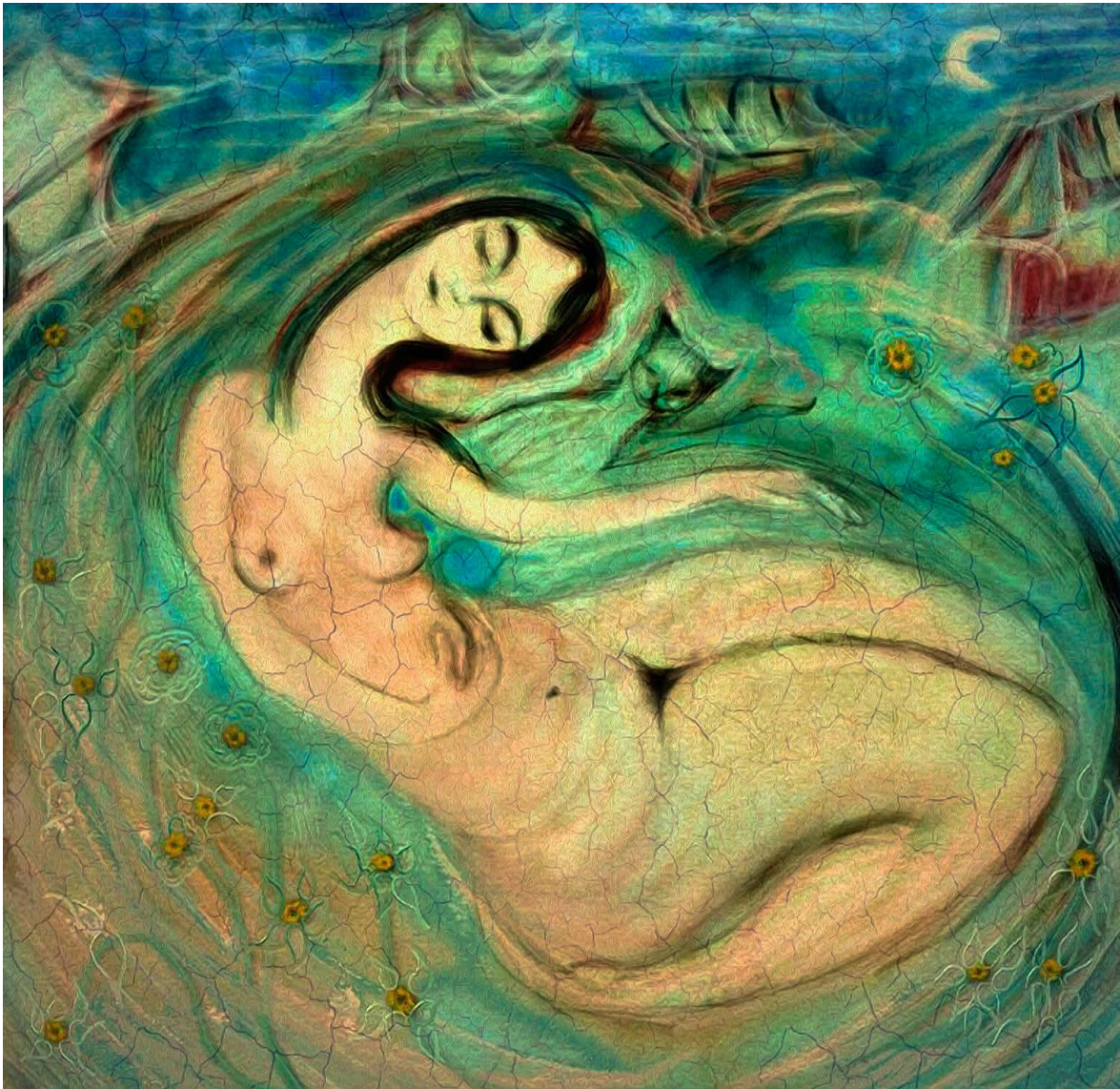
- Cocinar a una temperatura interna mínima de 71 °C por al menos 1 minuto.
- Evitar el consumo de embutidos artesanales no inspeccionados.
- Nunca probar carne cruda o poco cocida de origen desconocido.

CONCLUSIÓN

La triquinosis, aunque menos común en la actualidad, sigue siendo una amenaza real, especialmente en contextos donde se consume carne silvestre o de origen no regulado. Comprender su historia, sus formas de transmisión y las medidas preventivas es esencial para evitar esta enfermedad. La clave está en la educación, la vigilancia sanitaria y, sobre todo, en asegurar una correcta preparación de los alimentos.

R E F E R E N C I A S

- Dupouy-Camet J, Raffetin A, Rosca EC and Yera H (2021). Clinical picture and diagnosis of human trichinellosis. In Bruschi F (ed.) *Trichinella and Trichinellosis* (pp. 333-352). Elsevier. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821209-7.00010-X>.
- El-Wakil ES, Shaker S, Aboushousha T *et al.* (2023). In vitro and in vivo anthelmintic and chemical studies of *Cyperus rotundus* L. extracts. *BMC Complementary Medicine and Therapies* 23:15. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12906-023-03839-7>.



© Malú Méndez Lavielle. *Equinoccio*.

Gaeta R and Bruschi F (2021). History of the parasite and disease. In Bruschi F (Ed.) *Trichinella* and Trichinellosis (pp. 3-24). Elsevier. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821209-7.00008-1>.

Malone CJ, Oksanen A, Mukaratirwa S, Sharma and Jenkins E (2024). From wildlife to humans: The global distribution of *Trichinella* species and genotypes in wildlife and wildlife-associated human trichinellosis. *International Journal for Parasitology: Parasites and Wildlife* 24: 100934. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijppaw.2024.100934>.

Organización Mundial de la Salud (OMS) (2021). Parasitosis de transmisión alimentaria: Triquinosis. Recuperado de: <https://www.who.int/es/publications/i/item/WHO-UCN-NTD-VVE-2021.7>.

Pavel R, Ursoniu S, Lupu MA and Olariu TR (2023). Trichinellosis in Hospitalized Children and Adults from Western Romania: A 11-Year Retrospective Study. *Life* 13(4):969. DOI: <https://doi.org/10.3390/life13040969>.

Pozio E and Gomez Morales MÁ (2023). *Trichinella* and Trichinellosis:

From Wildlife to the Human Beings. In: Sing A (eds) *Zoonoses: Infections Affecting Humans and Animals*. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-27164-9_58.

Ramírez M (1981). Epidemiología de la trichinelosis (pp. 278-324). Recuperado de: <https://fmvz.unam.mx/fmvz/cienciavet/revistas/CVvol3/CVv3c10.pdf>.

Secretaría de Salud (2024). Boletín Epidemiológico. Vigilancia epidemiológica (p. 38). Recuperado de: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/958564/sem45.pdf>.

Yadesa G, Erara M, Fantahun S *et al.* (2020). Epidemiology, diagnosis and public health importance of Trichinellosis. *Journal of World's Poultry Research* 10(3):131-139. DOI: <https://doi.org/10.36380/scil.2020.ojaf18>.

Nancy Edith Rodríguez Garza
Facultad de Ciencias Biológicas
Universidad Autónoma de Nuevo León
nancy.rodriguezgrz@uanl.edu.mx

Hongos: nutrición, compuestos bioactivos y salud humana

Zoha **Bautista-Montero**
Aleyda **Pérez-Herrera**

Los hongos han formado parte de la alimentación humana desde tiempos antiguos debido a su sabor, textura y olor característicos. En la actualidad, se ha podido demostrar que los hongos son una excelente fuente de proteínas, carbohidratos, vitaminas y minerales. Además, son bajos en calorías y sodio y no contienen gluten, lo que los convierte en una opción nutritiva y adecuada para diversas dietas. También poseen compuestos bioactivos con propiedades medicinales que ofrecen beneficios para la prevención y el tratamiento de diversas enfermedades.

COMPUESTOS BIOACTIVOS: ¿QUÉ SON Y QUÉ BENEFICIOS TIENEN SOBRE LA SALUD?

Los compuestos bioactivos son moléculas presentes en diversos alimentos y que, al ser ingeridos, tienen efectos benéficos sobre la salud humana. Su origen químico es diverso y actúan a través de distintos mecanismos de acción. Investigaciones *in vitro* e *in vivo* han demostrado que tanto los extractos como los hongos frescos ofrecen múltiples actividades biológicas como se describe a continuación (Figura 1) (Navarro-Simarro *et al.*, 2024).

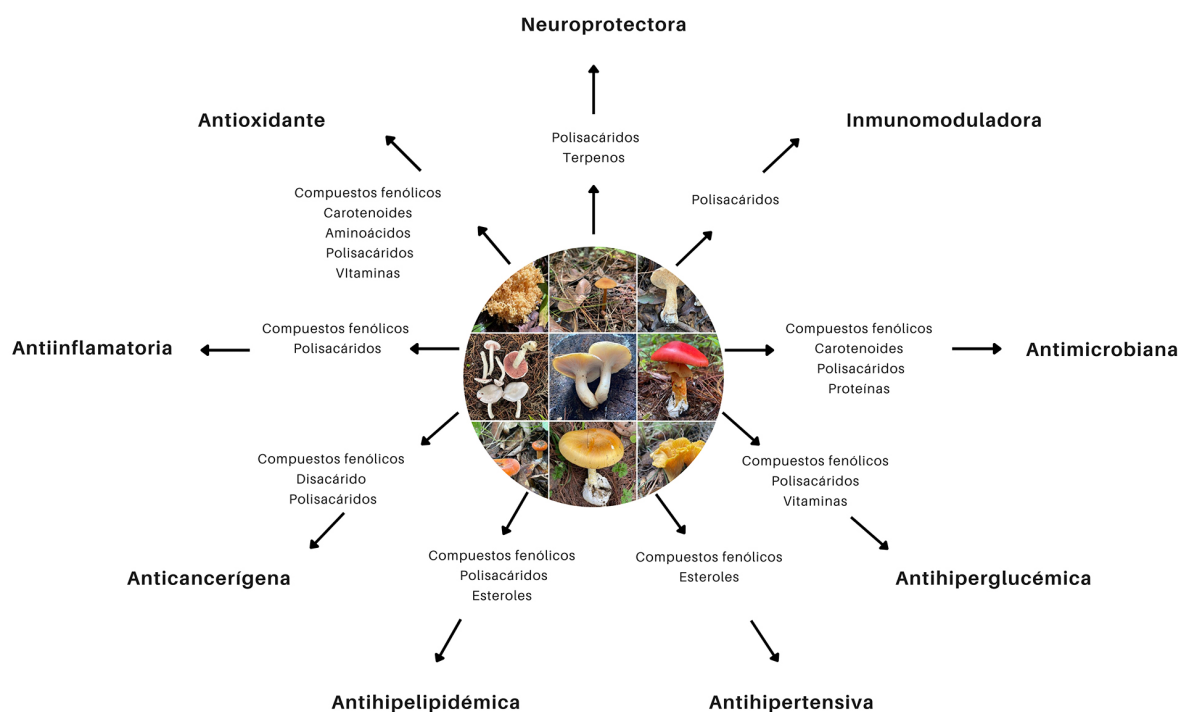


Figura 1. Beneficios de los hongos a la salud.

ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE

El estrés oxidativo es un fenómeno biológico que ocurre cuando hay un desequilibrio entre la producción de radicales libres y la capacidad del cuerpo para neutralizarlos. Los radicales libres son moléculas inestables que buscan estabilizarse captando electrones de otras moléculas en el cuerpo. Este proceso puede causar daño celular. Los antioxidantes ayudan a neutralizar estos radicales libres, gracias a su capacidad de donar electrones sin volverse inestables.

Los antioxidantes se clasifican en dos tipos: los endógenos, que son producidos por las células del cuerpo, y los exógenos, que provienen de los alimentos y se obtienen de la dieta. Los hongos poseen una amplia gama de compuestos con actividad antioxidante, entre los que se incluyen la ergotioneína, el ergosterol, diversos carotenoides, compuestos fenólicos, tocoferoles (vitamina E), ácido ascórbico (vitamina C), polisacáridos y aminoácidos. Los antioxidantes también se clasifican en

primarios (detienen los procesos de oxidación en cadena y neutralizan radicales libres) y secundarios o preventivos (actúan mediante distintos mecanismos, como la unión a metales (quelación), la descomposición de compuestos oxidantes como los hidroperóxidos lipídicos, la regeneración de antioxidantes primarios y la desactivación del oxígeno singlete, una forma de oxígeno molecular altamente reactiva). Además, algunos de los compuestos bioactivos presentes en los hongos pueden actuar como inductores o señalizadores celulares al modular la expresión génica y favorecer la activación de enzimas encargadas de eliminar especies reactivas de oxígeno (ROS) (Kozarski *et al.*, 2015).

ACTIVIDAD ANTIINFLAMATORIA

La inflamación es una respuesta natural del cuerpo cuando se lesiona o se ve afectado por infecciones o problemas del sistema inmune. Aunque esta respuesta es importante para proteger al cuerpo, también puede estar relacionada con enfermedades como la diabetes, Alzheimer, problemas cardíacos, respiratorios y hasta el cáncer.

En modelos animales se ha observado que los glucanos presentes en *Inonotus obliquus*, *Agaricus bisporus* y en otras especies, pueden inhibir la expresión de proteínas proinflamatorias. Así mismo, ciertos aminoácidos como la leucina, isoleucina, tirosina y fenilalanina también han mostrado acción antiinflamatoria importante, ya que influyen en las rutas metabólicas que regulan la producción de mediadores inflamatorios como las prostaglandinas, que se producen en el cuerpo como respuesta a una lesión, infección o estímulo inflamatorio (Muszyńska, 2018).

ACTIVIDAD ANTIMICROBIANA

Las enfermedades infecciosas causadas por bacterias, virus, hongos, parásitos o protozoos son una de las principales causas de enfermedades y muertes en el mundo.

Estos microorganismos tienen la capacidad de desarrollar resistencia a los tratamientos antimicrobianos, lo que dificulta su eliminación y representa una amenaza significativa para la salud pública global. Esta creciente resistencia ha impulsado la necesidad de encontrar nuevos tratamientos, como los basados en compuestos naturales.

En estudios *in vitro* se ha observado que los compuestos antifúngicos producidos por los hongos actúan sobre las paredes y membranas celulares de los hongos patógenos. Estos compuestos interfieren en la síntesis de quitina y glucanos, elementos esenciales para la integridad de la pared celular fúngica, y además inhiben la producción de ergosterol, componente fundamental para la membrana celular fúngica.

Como consecuencia, se produce una disfunción estructural y posterior lisis de las células patógenas. Algunas especies fúngicas generan cefalosporina y ácido fusídico, los cuales bloquean la formación de los enlaces que conectan las subunidades del peptidoglucano (mureína), lo que impide la formación de una pared celular bacteriana completa e inhibe la síntesis de proteínas en bacterias grampositivas (Sułkowska-Ziaja *et al.*, 2023).

ACTIVIDAD ANTICANCERÍGENA

El cáncer se caracteriza por el crecimiento descontrolado de células anormales, lo que puede llevar a la formación de tumores y a la propagación de células cancerígenas. Conforme la resistencia a los tratamientos convencionales aumenta y las terapias actuales se enfrentan a limitaciones, los hongos pueden ser una alternativa en la lucha contra esta enfermedad. En modelos animales, *Lentinula edodes* ha mostrado citotoxicidad selectiva contra células cancerosas mediante la activación de enzimas y proteínas que inducen apoptosis (proceso que elimina células que ya no son necesarias para el organismo). Además, estudios clínicos han reportado que los hongos pueden mejorar la eficacia de la quimioterapia y revertir la quimiorresistencia en células cancerosas (Sivanesa *et al.*, 2022).

ACTIVIDAD NEUROPROTECTORA

El cerebro es uno de los órganos más complejos de nuestro cuerpo. Con el tiempo, el envejecimiento, el estrés oxidativo y la inflamación pueden afectarlo y aumentar el riesgo de enfermedades.

En estudios *in vitro* en células humanas SH-SY5Y y en peces cebra se ha determinado que los metabolitos secundarios de *Inonotus obliquus* tienen propiedades neuroprotectoras, en particular el triterpenoide de lanostano. Su efecto protector se relaciona con la activación de las vías de señalización celular, importantes en las neuronas frente al estrés oxidativo y la apoptosis celular.

En estudios en ratones, los proteoglucanos (PGM) de *Grifola frondosa* reducen la pérdida neuronal, por lo que pueden mejorar el aprendizaje y la memoria. Además, los PGM ayudan a que ciertas células del cerebro, como la microglía y los astrocitos, se activen y empiecen a trabajar. Estas células cumplen funciones de defensa, como limpiar desechos y proteger a las neuronas. Gracias a los PGM, la microglía se dirige con mayor eficacia hacia las placas de β -amiloide (acumulaciones tóxicas



© Malú Méndez Lavielle. *Segundas*.

relacionadas con el Alzheimer) y mejora su capacidad para eliminarlas. Esto ayuda a reducir el daño y los cambios negativos en zonas del cerebro que son fundamentales para la memoria y el aprendizaje, como la corteza cerebral y el hipocampo (Badalyan y Rapior, 2021).

ACTIVIDAD INMUNOMODULADORA

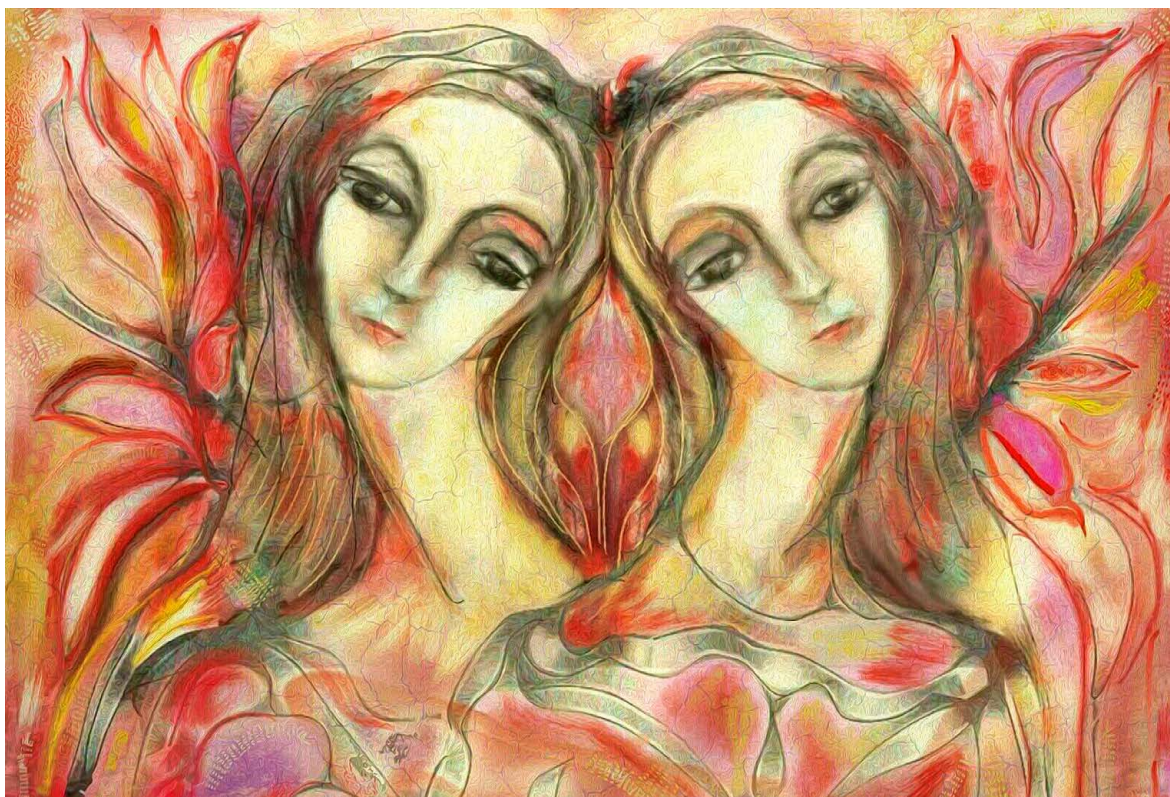
El sistema inmunitario es responsable de defender al cuerpo contra patógenos como bacterias, virus, hongos y otros agentes extraños. Sin embargo, en ocasiones, una respuesta inmunitaria excesiva o insuficiente puede ser perjudicial.

En estudios con ratas Wistar sometidas a inmunosupresión se determinó que los extractos de *Lentinula edodes*, *Agaricus bisporus*, *Pleurotus ostreatus*, *Pleurotus columbinus* y *Pleurotus sajor-caju* aumentaron significativamente los glóbulos blancos y los recuentos linfocíticos. *Ganoderma lucidum* contiene

polisacáridos con la capacidad de activar los linfocitos T, lo que ayuda a mejorar la respuesta del sistema inmunitario frente a infecciones y células tumorales. *Lentinula edodes* es rico en el polisacárido eritadonina, que puede aumentar la actividad de las células inmunitarias como los macrófagos y neutrófilos, esenciales en la defensa contra patógenos; además, puede mejorar la actividad de las células T, lo que refuerza la respuesta inmunitaria en el organismo (Zhou *et al.*, 2024).

ACTIVIDAD ANTIHIPERGLUCÉMICA

El aumento de los niveles de azúcar en sangre, también conocido como hiperglucemia, es una condición común en personas con diabetes, una de las enfermedades crónicas más prevalentes a nivel mundial. En trabajos *in vitro* se ha observado que los polisacáridos, compuestos fenólicos y vitaminas E y B1 de *Pleurotus ostreatus*, *Agaricus bisporus* y *Ganoderma lucidum* inhiben la actividad de la α -amilasa y la α -glucosidasa, enzimas importantes en el



© Malú Méndez Lavielle. *Dalías*.

metabolismo de carbohidratos, por lo que su modulación podría contribuir al manejo de alteraciones metabólicas como la diabetes tipo 2 (Wickramasinghe *et al.*, 2023).

ACTIVIDAD ANTIHIPERTENSIVA

La hipertensión (o presión arterial alta) es una de las principales preocupaciones de salud pública en todo el mundo. Si no se controla, puede aumentar el riesgo de enfermedades graves como ataques al corazón. Los hongos contienen queretina, ergosterol, lovastatina, cordicepina y eritadenina, que en modelos animales se ha podido observar que contribuyen a reducir la presión arterial al inducir la relajación de los vasos sanguíneos (vasodilatación). Este proceso mejora la circulación sanguínea y favorece la salud cardiovascular. En particular, la lovastatina, inhibe enzimas que son importantes en la biosíntesis del colesterol, lo que ayuda a controlar la dislipidemia y la hipertensión (Rauf *et al.*, 2023).

ACTIVIDAD ANTIHIPERLIPIDÉMICA

La hiperlipidemia (niveles altos de grasas en la sangre) puede llevar a problemas como la arterosclerosis (enfermedad en la que los triglicéridos, colesterol y otras sustancias en la sangre se adhieren a las paredes de las arterias formando una especie de placa, por lo que las arterias se hacen más estrechas y se reduce el suministro de sangre oxigenada en el cuerpo) y ataques al corazón. En estudios en ratones, los β -glucanos, el ergosterol, la eritadenina y el quitosano, presentes en los hongos, disminuyeron significativamente la absorción de grasas en el intestino, lo que incrementó la excreción fecal de lípidos y contribuyó a reducir su concentración en sangre (Kim *et al.*, 2019).

RIESGOS Y LIMITACIONES

Los hongos comestibles son una fuente valiosa de nutrientes y compuestos con potenciales beneficios

para la salud; sin embargo, su consumo y uso como complemento terapéutico enfrenta diversas limitaciones. Los hongos contienen metalotioneína, compuesto que tiene la capacidad de unirse a metales pesados a partir del sustrato en el que crecen, lo que produce su acumulación y representa un peligro para la salud humana. En la mayoría de los casos, las concentraciones presentes en hongos cultivados y recolectados en suelos no contaminados son seguras. Sin embargo, en regiones con contaminación ambiental o falta de regulación específica, estas concentraciones pueden ser elevadas. En el caso de México, la norma oficial (NOM-251-SSA1-2009) establece buenas prácticas de higiene para alimentos, mientras que normas internacionales de la FDA y Codex Alimentarius pueden ser usadas como referencia para los límites permisibles de metales pesados en alimentos.

La variabilidad en la composición química y medicinal de los hongos es otro factor importante. Una misma especie puede presentar diferentes concentraciones de compuestos bioactivos según las condiciones del suelo y factores ambientales. Esta falta de estandarización complica su aplicación terapéutica, pues no siempre es posible asegurar la misma cantidad de principios activos necesarios para lograr un efecto constante. En algunas personas se han documentado reacciones adversas como alergias debido al consumo o inhalación de esporas de *Agaricus bisporus*, o malestar gastrointestinal que puede variar desde náuseas leves y distensión abdominal hasta vómito y dolor abdominal.

Aunque los compuestos bioactivos de los hongos han mostrado resultados prometedores en estudios de laboratorio y modelos animales, aún se investiga cuánto de estas sustancias llega realmente a las células humanas, es decir, su biodisponibilidad. Este factor es clave para determinar si los beneficios observados en estudios experimentales se traducen en efectos reales en la salud de las personas. En conjunto, el consumo de hongos frescos y sus derivados suele ser seguro cuando provienen de fuentes confiables y se procesan adecuadamente.

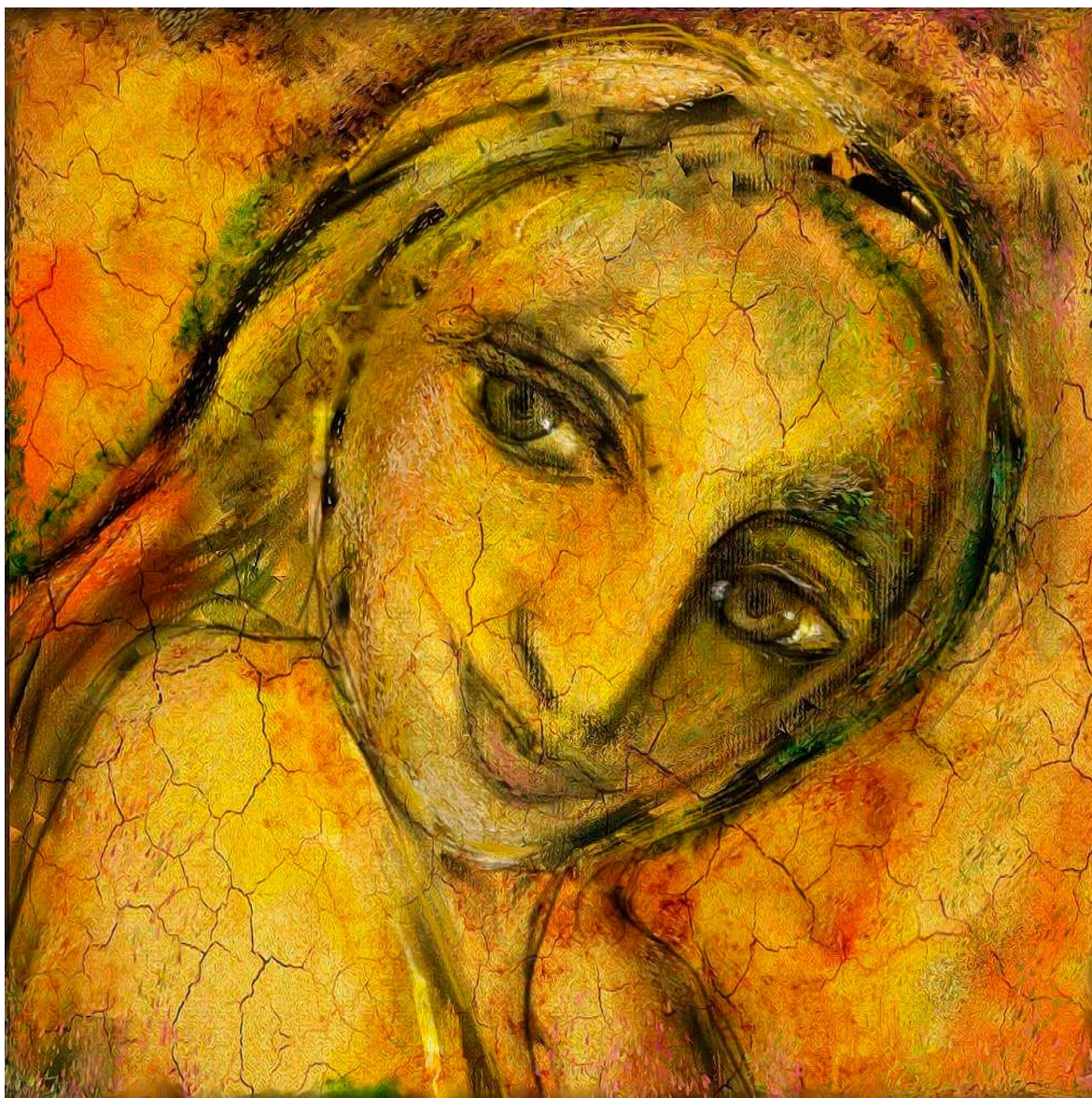
Sin embargo, es importante mantener una mirada crítica y considerar que su uso para tratar enfermedades aún requiere evidencia clínica sólida, así como comprender mejor cómo se absorben y actúan sus compuestos en el cuerpo humano. La comunidad científica sigue trabajando para garantizar alimentos que sean tanto inocuos como benéficos para la salud (Kozarski *et al.*, 2015).

CONCLUSIÓN

Los hongos son un recurso biológico de gran valor nutricional y medicinal. Diversos estudios han identificado metabolitos secundarios en diferentes especies fúngicas que poseen múltiples beneficios a la salud. Estas características los posicionan como posibles coadyuvantes en la prevención y tratamiento de enfermedades crónicas. No obstante, el aprovechamiento de los hongos con fines terapéuticos aún enfrenta limitaciones. La variabilidad en su composición química, la posible contaminación ambiental y la falta de estandarización en los extractos dificultan su aplicación clínica. Además, es necesario profundizar en el estudio de su biodisponibilidad. Con el avance en la investigación científica será posible optimizar su aprovechamiento en la alimentación y en la medicina en favor del bienestar humano.

R E F E R E N C I A S

- Badalyan S y Rapior S (2021). Agaricomycetes mushrooms (Basidiomycota) as potential neuroprotectants. *Italian Journal of Mycology* 50:30-43.
- Kim SH, Thomas MJ, Wu D, Carman CV, Ordovás JM y Meydani M (2019). Edible mushrooms reduce atherosclerosis in Ldlr^{-/-} mice fed a high-fat diet. *The Journal of Nutrition* 149(8):1377-1384.
- Kozarski M, Klaus A, Jakovljevic D, Todorovic N, Vunduk J, Petrović P, Niksic M, Vrvic M y Van Griensven L (2015). Antioxidants of edible mushrooms. *Molecules* 20(10):19489-19525.
- Muszyńska B, Grzywacz-Kisielewska A, Kała K y Gdula-Argasińska J (2018). Anti-inflammatory properties of edible mushrooms: A review. *Food chemistry* 243:373-381.
- Navarro-Simarro P, Gómez-Gómez L, Ahrazem O y Rubio-Moraga Á (2024). Food and human health applications of edible mushroom by-products. *New Biotechnology* 81:43-56.
- Rauf A, Joshi PB, Ahmad Z, Hemeg HA, Olatunde A, Naz S, Hafeez N & Simal-Gandara J (2023). Edible mushrooms as potential functional foods in amelioration of hypertension. *Phytotherapy Research* 37(6):2644-2660.



© Malú Méndez Lavielle. Gracias.

Sivanesan I, Muthu M, Gopal J y Oh JW (2022). Micoterapia anticancerígena asistida por polisacáridos de hongos: Revisión de sus ensayos clínicos. *Molecules* 27(13):4090.

Sułkowska-Ziaja K, Trepa M, Olechowska-Jarząb A, Nowak P, Ziaja M, Kała K Muszyńska B (2023). Natural compounds of fungal origin with antimicrobial activity: Potential cosmetics applications. *Pharmaceuticals* 16(9):1200.

Wickramasinghe MA, Nadeeshani H, Sewwandi SM, Rathnayake I, Kananke TC y Liyanage R (2023). Comparison of nutritional composition, bioactivities, and FTIR-ATR microstructural properties of commercially grown four mushroom species in Sri Lanka: *Agaricus bisporus*, *Pleurotus ostreatus*, *Calocybe* sp. (MK-white), *Ganoderma lucidum*. *Food Production, Processing and Nutrition* 5(43).

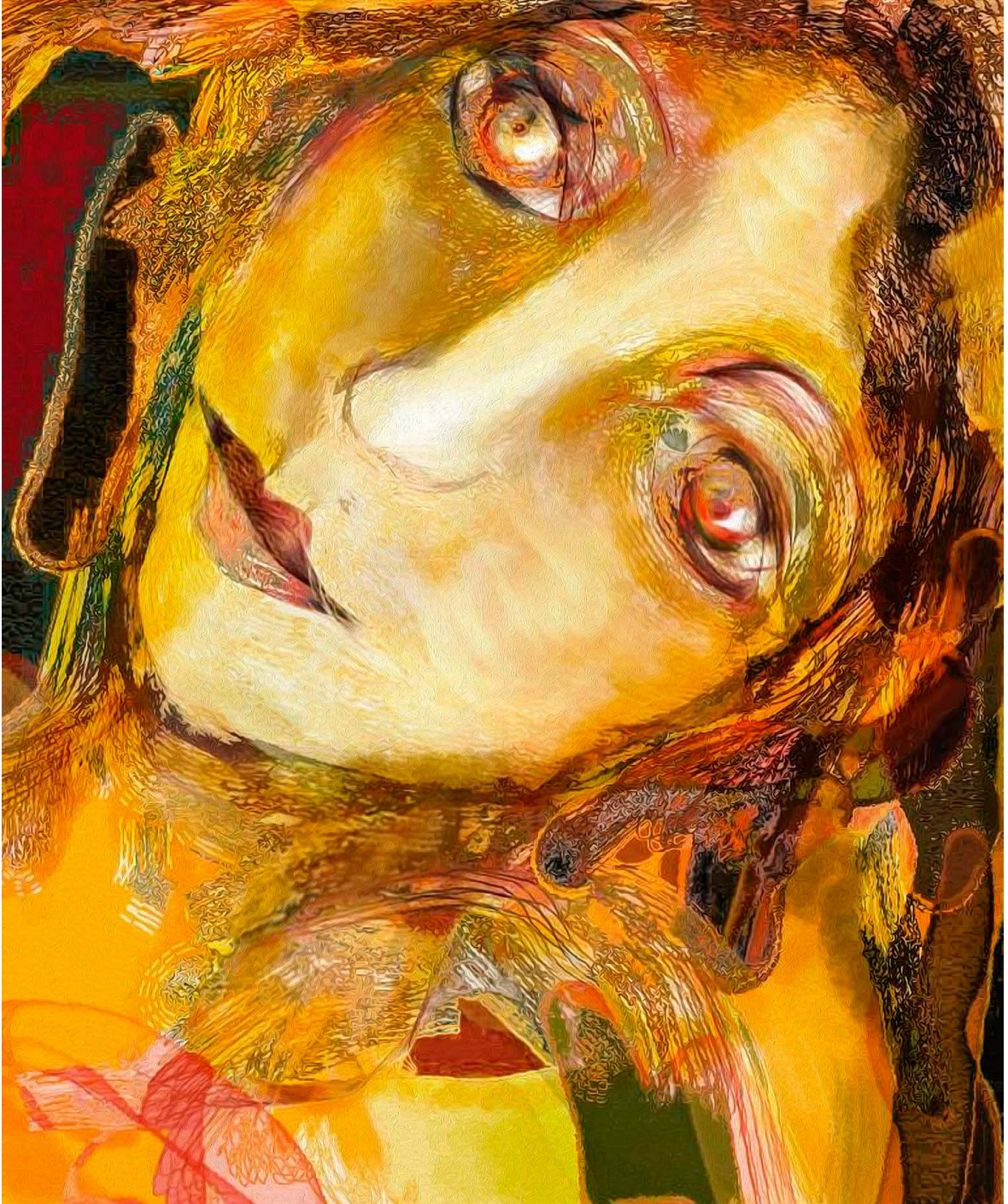
Zhou Y, Chu M, Ahmadi F, Agar OT, Barrow CJ, Dunshea FR y Suleria HAR (2024). A comprehensive review on phytochemical profiling in

mushrooms: Occurrence, biological activities, applications and future prospective. *Food Reviews International* 40(3):924-951.

Zoha Bautista-Montero1
Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca
Instituto Politécnico Nacional

Aleyda Pérez-Herrera
Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca
Instituto Politécnico Nacional
Secretaría de Ciencia, Humanidades
Tecnología e Innovación (SECIHTI)
alperzh@ipn.mx

© Malú Méndez Lavielle. *Claridad.*





Almacenamiento del calor solar: una tecnología para el suministro energético continuo

Luis Adrián **López Pérez**
Armando **Huicochea Rodríguez**

La irradiancia solar que llega a la superficie terrestre es de alrededor de 86,000 teravatios (TW) (Lindsey, 2009). Sin embargo, la noche, las nubes y las estaciones hacen que esta enorme fuente de energía sea intermitente y escasamente aprovechada. ¿Y si pudiéramos almacenar el calor del sol como si fuera agua en una presa?

El Sistema de Almacenamiento de Calor Solar (SACS) es una tecnología desarrollada para capturar, concentrar y acumular la energía solar en forma de calor en un fluido o sólido con niveles térmicos de 70 a 800 °C (Khan *et al.*, 2022). Esta tecnología puede ser usada en días nublados y durante la noche, y por ello, el SACS ayuda a reducir la dependencia de combustibles fósiles y la contaminación ambiental, logrando un suministro constante de calor para la generación eléctrica, procesos industriales y climatización de edificios, entre otros. Estos sistemas tienen muchas ventajas que los posicionan como una solución estratégica para la transición hacia energías más limpias. Una de ellas es el suministro de energía continuo, como en la planta Gemasolar, instalada en Sevilla, España, que puede alcanzar hasta 18 horas de autonomía sin radiación solar (Fritsch *et al.*, 2019). Además, ofrecen un costo de almacenamiento reducido en periodos de uso mayores a

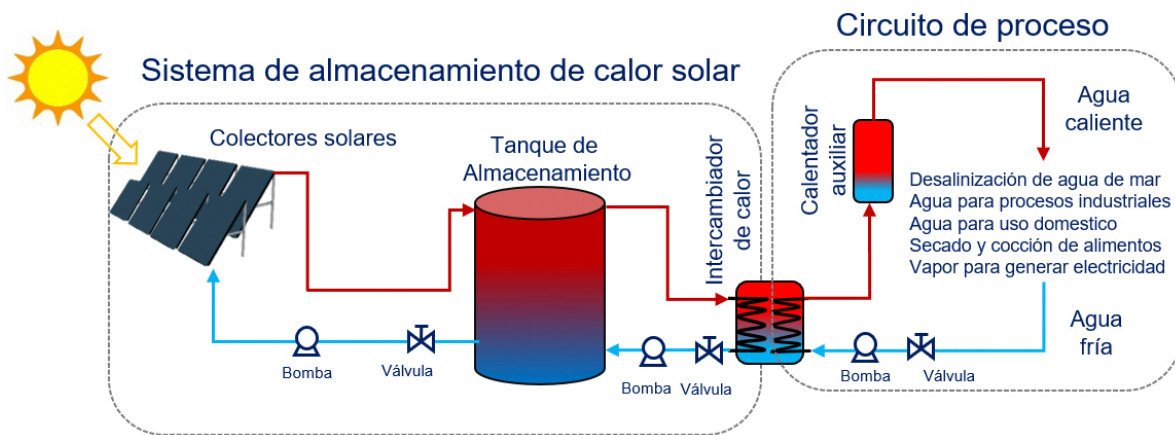


Figura 1. Componentes principales de un sistema de almacenamiento de calor solar. Esta tecnología busca asegurar el uso continuo del calor solar en una amplia variedad de aplicaciones, que van desde la calefacción de edificios de viviendas hasta la generación de electricidad con vapor sobrecalentado.

10 horas, gracias a que los materiales usados como agua, sales fundidas o rocas son más económicos que las baterías de ion-litio (Jacob *et al.*, 2023). Los SACS pueden almacenar mucha energía, alcanzando hasta 150 MW a 565 °C y generar hasta 500 GWh de electricidad, es decir, la suficiente energía para abastecer 120,000 hogares (Benbba *et al.*, 2024). Además, se destacan por su versatilidad industrial, ya que el calor almacenado puede usarse directamente en procesos de alta temperatura o en sistemas de calefacción distrital. Las sales fundidas, ampliamente utilizadas, son químicamente estables y soportan múltiples ciclos térmicos sin degradación significativa. Finalmente, su tecnología base es fiable y ampliamente implementada a nivel mundial, lo que favorece su adopción y desarrollo (Khan *et al.*, 2022).

FUNCIONAMIENTO

Un SACS opera en un circuito cerrado, integrado por un campo de colectores solares, un tanque de almacenamiento, un intercambiador de calor, un calentador auxiliar, bombas de circulación y válvulas de control (Figura 1). El campo de colectores solares calienta un fluido (agua o refrigerante) mediante la irradiación solar. El tanque de almacenamiento, que generalmente es un cilindro metálico aislado, acumula el calor en materiales como agua,

sales fundidas o materiales de cambio de fase. Las bombas impulsan el fluido entre los componentes, mientras que las válvulas regulan el caudal y la presión del fluido. El intercambiador de calor traslada el calor mediante el paso de un líquido al sistema de uso final, y el calentador auxiliar, eléctrico o de combustión, aumenta la temperatura del fluido en periodos de baja irradiación solar, hasta alcanzar la temperatura requerida.

EL NÚCLEO DEL SISTEMA

El campo de colectores solares y el tanque de almacenamiento son el núcleo del SACS (López-Pérez y Huicochea, 2025). El campo de colectores solares puede ser de placa plana, tubos de vacío o concentradores (Figura 2). Los colectores de placa plana y tubos de vacío capturan la radiación solar para calentar un fluido (agua, aire o anticongelante) que circula por una placa absorbente oscura. La ventaja principal de estos dispositivos es su alta eficiencia térmica de hasta un 80 %, debido a que convierten directamente la radiación solar en calor sin pérdidas por conversión energética intermedia. Estos colectores alcanzan temperaturas de hasta 150 °C, por lo que son utilizados para aplicaciones de baja y media temperatura como calefacción, agua caliente sanitaria y procesos industriales. Los concentradores solares utilizan espejos o lentes para concentrar los rayos solares en un área

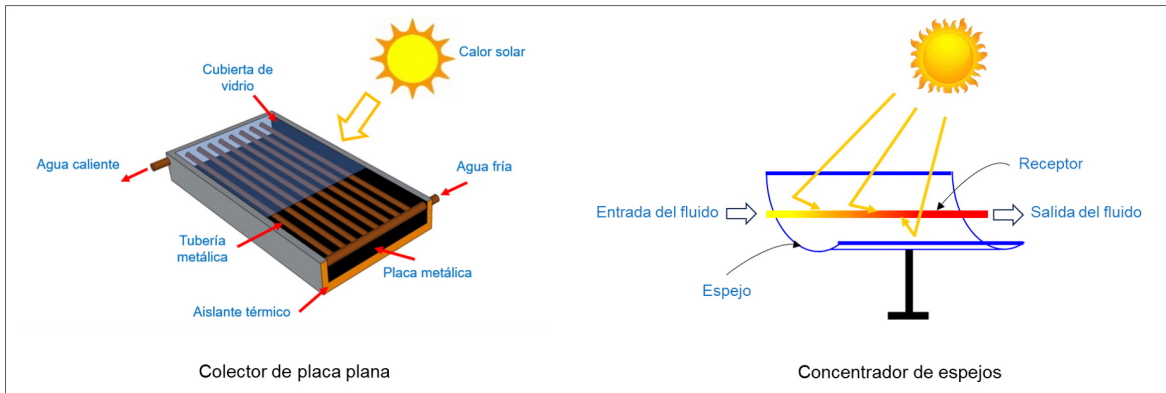


Figura 2. Componentes de un colector solar de placa plana (izquierda) y de un concentrador de espejos (derecha). Los colectores solares calientan un fluido caloportador (agua o refrigerante) mediante la irradiación solar.

pequeña, generando temperaturas superiores a los 300 °C. Este calor intenso produce vapor para generar electricidad a gran escala, con eficiencias en la conversión a energía eléctrica que rondan entre el 30 % y el 40 % (dependiendo del diseño y la tecnología). Los concentradores solares requieren grandes extensiones de terreno y suelen emplearse en plantas de energía solar térmica.

El tanque de almacenamiento térmico es el componente que permite aprovechar el calor solar continuamente (Figura 1). Los materiales utilizados en este componente varían según el mecanismo de almacenamiento y el rango de temperatura (Tabla 1) (Khan *et al.*, 2022). Para almacenar calor a temperaturas de hasta 100 °C, se utiliza agua y parafinas. Para temperaturas de hasta 300 °C, se utiliza hormigón y sales fundidas, como nitratos de sodio y potasio ($\text{NaNO}_3/\text{KNO}_3$). Para temperaturas de entre 200 y 500 °C, se utilizan materiales reactivos como hidróxido de calcio, zeolitas o silicagel. Finalmente, para temperaturas de hasta 800 °C, se utilizan sales ternarias (Li, Na, K) y aire comprimido.

APLICACIONES

Los SACS tienen una amplia variedad de aplicaciones, que van desde la calefacción de edificios de viviendas hasta la generación de electricidad con vapor sobrecalentado (Tabla 1). Para aplicaciones de agua caliente sanitaria, calefacción y climatización de piscinas, se utiliza agua almacenada en tanques

convencionales o en acuíferos subterráneos, aprovechando su bajo costo, disponibilidad y pérdidas térmicas controladas. En sistemas de climatización y refrigeración solar se utilizan parafinas, sales hidratadas o metales eutécticos, ya que ofrecen mayor densidad energética. En procesos industriales, se emplean sales fundidas de baja pureza, cerámicos o hormigón, debido a que aportan estabilidad térmica y resistencia a ciclos repetidos. En plantas de energía solar por concentración, se requieren sales ternarias (Li, Na, K) o aire comprimido, capaces de alcanzar temperaturas elevadas. Finalmente, para el almacenamiento estacional o a largo plazo, se utilizan soluciones termoquímicas de hidróxido de calcio, zeolitas o silicagel, las cuales permiten altas densidades de energía con pérdidas mínimas.

Una aplicación real es la planta termosolar Gemasolar en Andalucía, Sevilla, España, destacada por su eficacia y operatividad de los SACS (Fritsch *et al.*, 2019). Esta central termosolar utiliza una tecnología de receptor central en torre, generando 110 GWh anuales de energía eléctrica. Su campo solar tiene 2,650 heliostatos, que reflejan y dirigen la luz solar al tanque de almacenamiento, localizado en una torre a 140 metros de altura. Su sistema de almacenamiento térmico consiste en sales fundidas (60 % NaNO_3 , 40 % KNO_3), y alcanzan temperaturas de hasta 565 °C. Esta configuración, con su sistema de control automatizado, logra hasta 18 horas

Clasificación	Tipo	Materiales/Medio	Especificaciones Técnicas	Aplicaciones
Por mecanismo	Calor sensible	Agua, sales fundidas (NaNO ₂ /KNO ₃), hormigón.	<ul style="list-style-type: none"> Densidad energética: 10-100 kWh/m³. Temperatura de operación: 100°C (agua) a 565°C (sales). Eficiencia: 50-80 %. 	Plantas de concentración solar de potencia, calefacción central, procesos industriales.
	Calor latente	Parafinas, sales hidratadas, metales eutécticos.	<ul style="list-style-type: none"> Densidad energética: 50-150 kWh/m³. Temperatura de operación: 0-300 °C. 	Climatización, refrigeración solar, estabilización térmica en edificios.
	Termoquímico	Hidróxido de calcio, zeolitas, silicagel.	<ul style="list-style-type: none"> Densidad energética: hasta 500 kWh/m³. Temperatura de operación: 200-500 °C. Estado: Experimental. 	Almacenamiento a largo plazo sin pérdidas, aplicaciones industriales en desarrollo.
Por temperatura	Baja (<150°C)	Tanques de agua, Almacenamiento subterráneo (acuíferos).	<ul style="list-style-type: none"> Capacidad: 500 L a 10,000 m³. Pérdidas térmicas: <5 % diarias. 	Agua caliente sanitaria residencial, calefacción, climatización de piscinas.
	Media (150-300°C)	Sales fundidas de baja pureza, cerámicos.	<ul style="list-style-type: none"> Densidad energética: 60-120 kWh/m³. Resistencia: Ciclos térmicos repetidos. 	Procesos industriales (lavanderías, pasteurización), redes urbanas.
	Alta (>300°C)	Sales ternarias (Li, Na, K), Aire comprimido.	<ul style="list-style-type: none"> Temperatura de operación: hasta 800 °C. Eficiencia: 30-40 % (conversión a electricidad) 	Plantas de concentración solar de potencia, siderurgia, generación eléctrica.
Por duración	Corto plazo (horas/días)	Tanques aislados, Materiales de cambio de fase.	<ul style="list-style-type: none"> Pérdidas térmicas: <5 % diarias. Compactibilidad: Diseños modulares. 	Climatización nocturna, demanda eléctrica puntual.
	Largo plazo (estacional)	Almacenamiento en acuíferos, Almacenamiento en pozos.	<ul style="list-style-type: none"> Eficiencia: 50-70 % Capacidad: Meses de almacenamiento. 	Equilibrio de demanda energética anual, calefacción/refrigeración estacional.

Tabla 1. Clasificación de SACS según su mecanismo, rango de temperatura y materiales utilizados (Khan *et al.*, 2022). Además, se presentan sus aplicaciones en sectores como climatización, procesos industriales y generación eléctrica.

de suministro eléctrico continuo sin radiación solar, abasteciendo a 27,500 hogares y evitando alrededor de 30,000 toneladas de emisiones de CO₂ anuales. Sin embargo, la planta requirió una inversión de 419 millones de dólares, equivalente a 33 dólares por cada watt instalado.

DESAFÍOS DE LOS SACS

Los SACS enfrentan desafíos que debemos resolver para aprovechar todo su potencial, principalmente relacionados con sus materiales y las condiciones operativas (Prabhu y Sawant, 2024). Un problema habitual son las pérdidas de calor en tuberías e intercambiadores, lo que reduce la eficiencia del

sistema. Los SACS que emplean sales fundidas requieren de calentadores auxiliares para mantener una temperatura estable y evitar que se solidifiquen, lo que incrementa los costos. Un reto importante es la corrosión, que se intensifica a temperaturas superiores a 600 °C, comprometiendo la vida útil del sistema.

Adicionalmente, demandan considerables volúmenes de almacenamiento, lo que puede representar una limitación en términos de espacio. Las tecnologías más avanzadas, como el almacenamiento termoquímico, se enfrentan a desafíos como la baja conductividad térmica en materiales de cambio de fase, problemas de estabilidad química y costos elevados de implementación. En conjunto, estos factores representan barreras críticas para lograr que los SACS sean más eficientes y accesibles.

PANORAMA ACTUAL DEL SACS EN MÉXICO

Para fomentar la transición energética, el Gobierno Federal, a través de la Comisión Federal de Electricidad, está impulsando decididamente la Concentración Solar de Potencia (CSP) con almacenamiento térmico, con una inversión de 800 millones de dólares en dos centrales termosolares en Baja California Sur para garantizar el suministro eléctrico de hasta 12 horas de autonomía, utilizando SACS con sales fundidas (Gobierno de México, 2025). Paralelamente, en el sector privado predominan los Sistemas de Almacenamiento de Energía en Baterías (BESS, por sus siglas en inglés). Esto se debe a que la Ley de Transición Energética, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 24 de diciembre de 2015, exige que los nuevos proyectos renovables cuenten con al menos un 30 % de capacidad de almacenamiento, lo que ha favorecido las baterías frente al almacenamiento térmico. Esta medida, aunque bien intencionada, pone en desventaja a los SACS, a pesar de que pueden proveer energía durante periodos mucho más largos, de hasta 18 horas los SACS frente a las 4 horas de los BESS (Elalfy *et al.*, 2024). En el sector industrial, nuestro país cuenta con más de 83 plantas que ya utilizan calor solar, principalmente en la industria alimentaria (Sánchez y Torres, 2020). Sin embargo, la adopción de los SACS sigue siendo limitada, debido a los altos costos iniciales asociados y la competencia con gas natural. La implementación de los SACS en México depende en gran medida de que el marco regulatorio reconozca las ventajas que ofrece esta tecnología para la descarbonización industrial. En este sentido, se requiere la creación de incentivos específicos y mecanismos que reconozcan la importancia del almacenamiento térmico de larga duración.

CONCLUSIONES

Los sistemas de almacenamiento de calor solar emergen como una tecnología clave para la transición energética en nuestro país, particularmente para aplicaciones que requieren un suministro de calor

continuo como procesos industriales, sistemas de generación eléctrica y calefacción. Estos sistemas ofrecen ventajas tecno-económicas significativas comparadas con las baterías de ion-litio, particularmente para el almacenamiento de larga duración. Sin embargo, su implementación enfrenta desafíos técnicos y económicos como pérdidas de calor, corrosión a altas temperaturas, necesidad de grandes volúmenes de almacenamiento y elevados costos iniciales. En nuestro país, el panorama de esta tecnología es alentador pero inconsistente, a causa del bajo costo del gas natural y un marco regulatorio que prioriza el almacenamiento de energía eléctrica en baterías. La consolidación de los SACS en México depende en gran medida de superar las barreras técnicas mediante investigación y desarrollo, y de implementar políticas energéticas que reconozcan y aprecien su capacidad única para suministrar energía gestionable de larga duración. Esta característica es esencial para la transición hacia un sistema energético descarbonizado y fiable, donde el SACS pueda desempeñar un papel estratégico y complementario frente a otras tecnologías renovables.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por su respaldo financiero para llevar a cabo este trabajo.

R E F E R E N C I A S

- Benbba R, Barhdadi M, Ficarella A *et al.* (2024). Solar Energy Resource and Power Generation in Morocco: Current Situation, Potential, and Future Perspective. *Resources* 13:1-38.
- Elalfy DA, Gouda E, Kotb MF *et al.* (2024). Comprehensive review of energy storage systems technologies, objectives, challenges, and future trends. *Energy Strategy Reviews* 54:101482.
- Fritsch A, Frantz C and Uhlig R (2019). Techno-economic analysis of solar thermal power plants using liquid sodium as heat transfer fluid. *Solar Energy* 177:155-162.
- Gobierno de México (2025). México a la vanguardia: CFE construirá 2 centrales termosolares en Baja California Sur para beneficiar hasta 200 mil hogares. Recuperado de: <https://www.gob.mx/presidencia/prensa/mexico-a-la-vanguardia-cfe-construira-2-centrales-termsolares>



© Malú Méndez Lavielle. *Arlequina*.

[en-baja-california-sur-para-beneficiar-hasta-200-mil-hogares](#). Consultado el 27 de octubre de 2025.

Jacob R, Hoffmann M, Weinand JM *et al.* (2023). The future role of thermal energy storage in 100 % renewable electricity systems. *Renewable and Sustainable Energy Transition* 4:100059.

Khan MI, Asfand F and Al-Ghamdi SG (2022). Progress in research and technological advancements of thermal energy storage systems for concentrated solar power. *Journal of Energy Storage* 55:105860.

López-Pérez LA and Huicochea A (2025). Solar-powered absorption heat transformer: energy performance assessment in dry climates. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 47:320.

Lindsey R (2009). Climate and Earth's Energy Budget. Recuperado de:

<https://Earthobservatory.Nasa.Gov/Features/EnergyBalance>. Consultado el 28 de octubre de 2025.

Prabhu P and Sawant S (2024). Solar Thermal Energy Storage Technology: Current Trends. In *Techno-Societal 2022* (pp. 429-437). Springer International Publishing.

Sánchez I y Torres R (2020). *Calor solar para procesos industriales: estudio de potencial en la industria de conservas alimenticias en México*. México: Cámara Nacional de la Industria de Conservas Alimenticias.

Luis Adrián López Pérez
Armando Huicochea Rodríguez
Centro de Investigación en Ingeniería
y Ciencias Aplicadas
Universidad Autónoma del Estado de Morelos
huico_chea@uaem.mx

Construir deconstruyendo: síntesis de alcaloides a partir de simples N-heterociclos

Fernando **Sartillo-Piscil**

Se puede decir, sin riesgo de equivocación, que la condición de la química reposa sobre los hombros de la síntesis orgánica (SO); sí, en la compleja actividad científica que consiste en la construcción de moléculas orgánicas a partir de entidades químicas simples. Y, dicho sea de paso, se puede enfatizar que esta labor ha sido la responsable de que no solo la se haya desarrollado hasta los niveles máximos de utilidad, sino que también permitió que otras ciencias relacionadas se hayan potenciado.

Y sin buscar tecnicismos complejos, podemos argumentar que muchas bases de la elevada disciplina intelectual que demanda la SO yacen en el libro titulado “The Logic of Chemical Synthesis” del galardonado Nobel James Elias Corey (Corey, 1995). Así es, con base en lo descrito en este libro fundamental, podemos llegar a pensar que, si lo entendemos, seremos capaces de hacer SO aplicando simplemente la lógica. Para nuestra desgracia (incluyéndome, obviamente), la lógica de un personaje del nivel de E. J. Corey es simplemente diferente (refiero al grado y no a la forma) para la gran mayoría de químicos que hacemos síntesis orgánica, especialmente cuando se trata de sintetizar moléculas complejas.

Pues bien, esperando no cometer el pecado de la trivialización de uno de los documentos más influyentes de



E. J. Corey

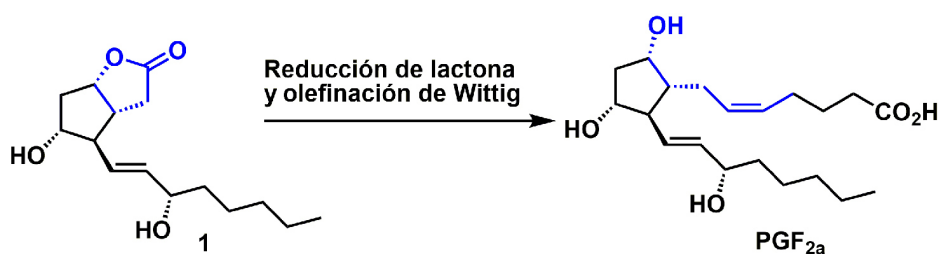


Figura 1. Síntesis de la PGF_{2a} de Corey como ejemplo de refuncionalización.

la SO, me atrevo a decir que toda la lógica que debe existir en el diseño del análisis (retro)sintético se basa en el proceso químico de refuncionalización. Es decir, identificar el grupo funcional o fragmento estructural en cuestión y transformarlo en otro diferente. Veamos un ejemplo representativo (Figura 1). En la última parte de su síntesis total de la prostaglandina PGF_{2a} (Corey *et. al.*, 1970), lo que ocurre es una transformación (refuncionalización) del grupo γ -lactona (resaltado en azul) a un grupo hidroxilo y uno olefínico a través de la aplicación de dos reacciones químicas: la reducción del grupo carbonilo de la lactona y una olefinación de Wittig (Figura 1). Evidentemente, ahora en retrospectiva y con más de 50 años desde que se publicó esta síntesis, podemos estar de acuerdo en que la refuncionalización de 1 generaría “lógicamente” a PGF_{2a}; sin embargo, como todo un clásico en las ciencias (y ocurre en las artes también), debido a las leyes que obedecen las ideas innovadoras, estas no son fácilmente reconocidas en el momento de su aparición, tienen que pasar los años para que sean reconocidas en su plenitud.

Y no es que haya pasado de “moda” este tipo de análisis sintético; la gran mayoría de investigadores lo seguimos empleando cotidianamente. Más bien, se ha ido profundizando a tal grado que ahora ya no se requiere de un grupo funcional para refuncionalizarlo; es decir, ahora se puede funcionalizar una posición de una molécula que no estaba funcionalizada. Incluso se puede llevar a cabo la deconstrucción del esqueleto de una molécula y su reconstrucción en una nueva forma estructural,

bajo un enfoque no “lógico” que no requiere identificar un grupo funcional preexistente dentro de la estructura molecular. A este tipo de análisis sintético “no lógico” comúnmente se le conoce como Edición Molecular (Ma *et al.*, 2024); y generalmente son los metales de transición o metales preciosos los que son capaces de activar (otro término utilizado para describir la funcionalización) enlaces no reactivos, tales como los enlaces C–H y C–C, para que posteriormente se reorganice el esqueleto molecular (Jurczyk *et al.*; 2022). Dicho en otras palabras, estos pares de átomos unidos fuertemente pueden ser visualizados como grupos funcionales, al menos para el análisis sintético. Por tanto, no podemos negar que estamos entrando a un cambio paradigmático en el uso de elementos de análisis para la planeación de la síntesis de moléculas orgánicas. Sin embargo, como en la vida cotidiana misma, todo tiene un precio, y en este caso no solo es económico, sino también ecológico. Para llevar a cabo estas activaciones, normalmente se requiere de condiciones de reacción muy especiales, como disolventes anhidros, atmósferas inertes, prefuncionalización de sustratos (empleo de grupos directores), entre otras operaciones químicas que inherentemente encarecen el proceso químico y, por consecuencia, contaminan el medio ambiente a través del desecho de los residuos metálicos. En este sentido, no es exagerado decir que esta forma de hacer química es casi exclusiva de los laboratorios de investigación que poseen los recursos económicos y la infraestructura suficiente para conducir este tipo de proyectos de investigación, o sea, laboratorios del “primer mundo”. Y como el nuestro está muy lejos de aquellos, nos hemos

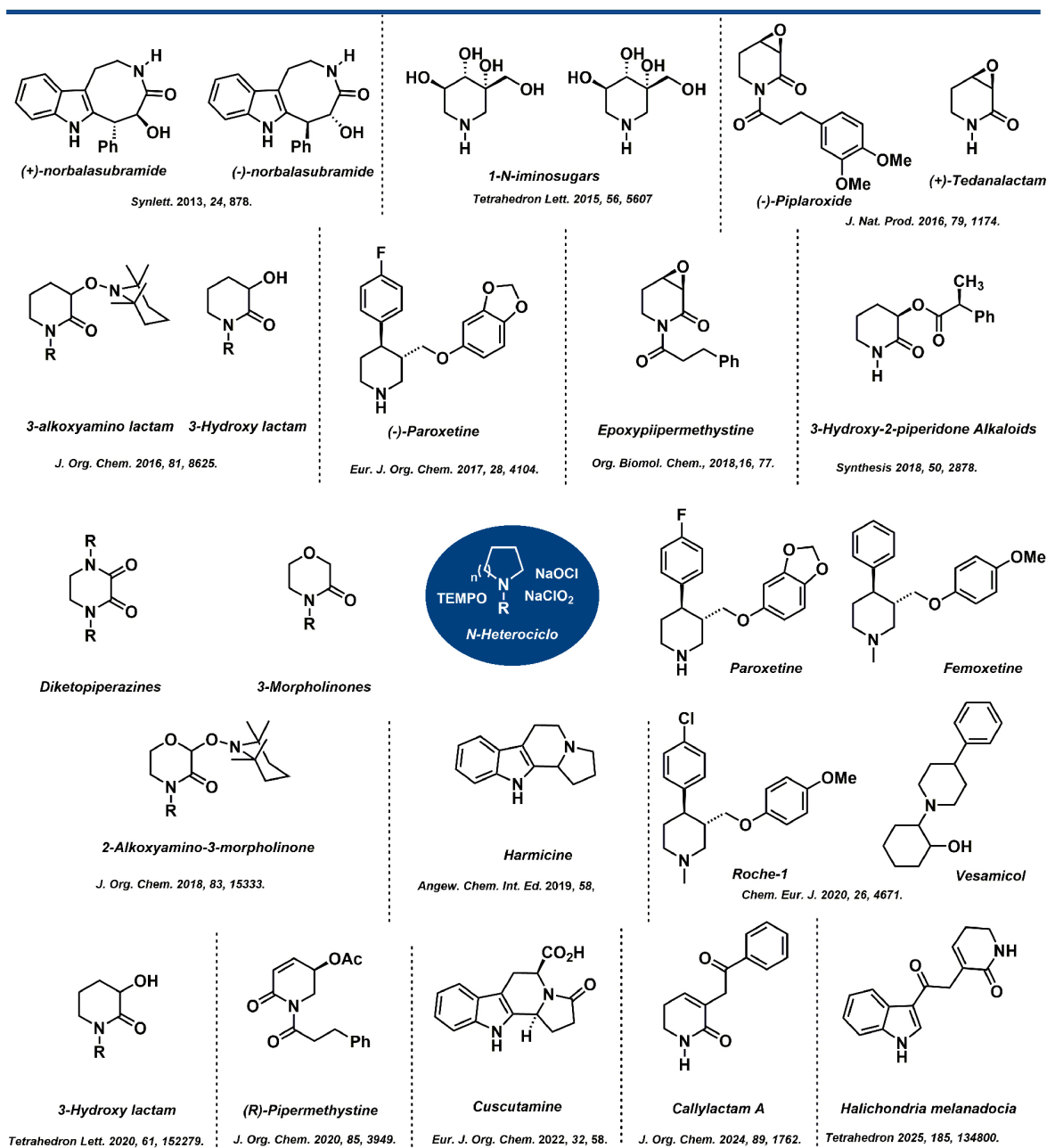


Figura 2. Funcionalizaciones selectivas de *N*-heterociclos en ausencia de metales de transición desarrolladas desde el 2013 en nuestro laboratorio.

obligado a aproximarnos a esta química bajo un enfoque completamente diferente, un enfoque rudimentario que se asemeja a lo artesanal, el cual evidentemente se aleja del uso de estos metales caros y tóxicos.

Con este ideal, en los últimos 12 años (López-Mendoza *et al.*, 2025), nuestro grupo de investigación ha desarrollado varias estrategias y tácticas sintéticas para la rápida y fácil funcionalización de enlaces C–H y C–C de *N*-heterociclos, aplicadas en la síntesis de

alcaloides biológicamente relevantes (Figura 2). Esta tecnología sintética se caracteriza por ser simple, económica y amigable con el medio ambiente, ya que al emplear como reactivos a la triada oxidante¹ de TEMPO, NaClO₂ y NaOCl, las reacciones se pueden llevar a cabo con disolventes no anhidros y en condiciones “open flask”, donde el único residuo metálico que se genera es cloruro de sodio (NaCl).

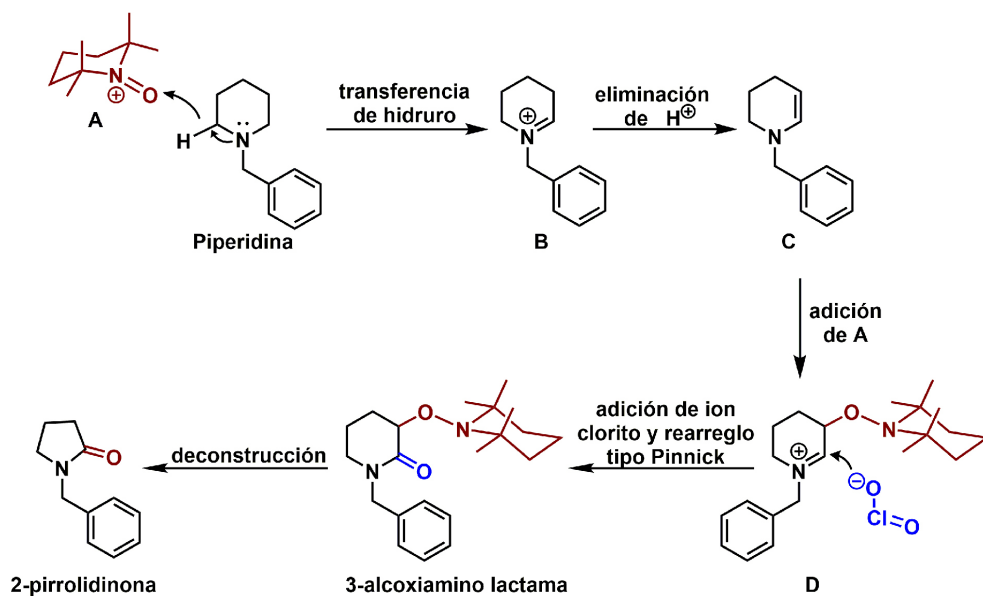


Figura 3. Edición molecular de piperidinas a 2-pirrolidinona.

Entre los alcaloides más representativos que han sido sintetizados bajo este enfoque se encuentran algunos de origen natural como la piplaxoxide, la cual, al ser sintetizada por primera vez, fue posible asignar su configuración absoluta. Lo mismo ocurrió con la epoxipipermetistina. También, hemos sintetizado alcaloides no naturales de importancia farmacéutica como la paroxetine, femoxetine y vesamicol. Y recientemente, alcaloides indólicos de origen marino como la callylactama A, y a un derivado indólico, entre muchos otros (Figura 2).

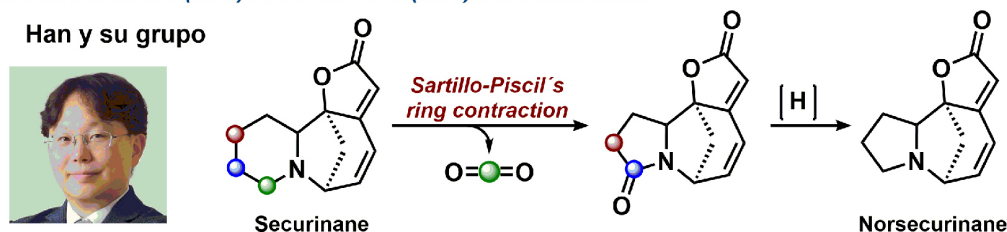
Ahora, en retrospectiva, podemos establecer que esta forma simple de editar la estructura molecular de *N*-heterociclos inició con la invención de la reacción de doble C–H oxidación de las posiciones α y β de la piperidina (Osorio-Nieto *et. al.*, 2016) a su correspondiente 3-alcóxiamino lactama,² y se expandió (Romero-Ibañez *et al.*, 2019) hasta la deconstrucción/contracción del heterociclo a sus correspondiente 2-pirrolidinona³ (Figura 3). La manera en que se lleva a cabo esta transformación química se puede describir, en términos románticos, como el camino sinuoso de funcionalizaciones en cascada que inicia con la interacción afectiva entre la pareja complementaria de A y la piperidina, cuyo destino

se conduce a través de la formación intermedios inestables (B→C→D) que irremediamente terminarían en la formación de la 2-pirrolidinona.

Esta secuencia ininterrumpida de reacciones, la cual alude al título del presente manuscrito, mostró su valía en la deconstrucción de la securinane a la norsecurinane desarrollada por el grupo de Han (Seoyoung *et al.*, 2024). Y, como reconocimiento a nuestra reacción química, el paso clave de la deconstrucción del anillo piperidínico fue denominado como la “Sartillo-Piscil’s ring contraction”, ya que en sí es una operación global de contracción de un anillo de seis miembros a uno de cinco con la concomitante expulsión de CO₂ (Figura 4).⁴

Se podría pensar que esta exagerada vanidad por resaltar nuestra reacción de deconstrucción está fundada, no solo en la inmediatez de su impacto, sino también en su aplicabilidad en sistemas estructuralmente complejos. Pues en la edición selectiva sobre el sistema tetracíclico-fusionado del alcaloide securinane al norsecurinane de Han, y a la síntesis de la cuscutamina por nuestro grupo de investigación, los factores estéricos (volumen espacial de los sustituyentes) y de tensión angular no afectaron el desarrollo de la reacción misma. Esto sugiere que posee elementos intrínsecos que tienen las reacciones que pueden aspirar a volverse “reacciones clásicas”.

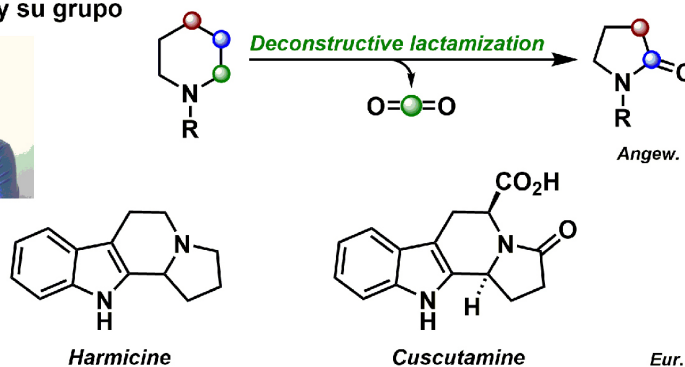
Deconstrucción de (allo)securinine a (allo)norsecurinine



Front. Chem. 2024, 12, 1355636.

Lactamización deconstructiva de Piperidines

Sartillo-Piscil y su grupo



Angew. Chem. Int. Ed. 2019, 58, 8867.

Eur. J. Org. Chem. 2022, 32, 58.

Figura 4. Edición molecular en alcaloides piperidínicos usando nuestra lactamización deconstructiva.

¿Pero cómo ocurre esta reacción?, es decir, ¿cuál es el mecanismo de reacción? Aquí una breve descripción (Figura 5). La reacción de deconstrucción de la piperidina ocurre cuando la 3-alcoxi-amino lactama reacciona con un agente oxidante (m-CPBA) para generar a E, el cual se transforma inmediatamente en el intermediario F, y después de un rearrreglo de Baeyer-Villiger genera a G, para que finalmente forme la 2-pirrolidinona después de expulsar CO_2 . De acuerdo con cálculos computacionales, esta expulsión de CO_2 ocurre de manera concertada⁵ y es favorecida por un efecto entrópico (Romero-Ibañez et al., 2019).

Un año después de nuestra publicación, el grupo de Bower reportó una contracción similar de ureas cíclicas de 7 miembros a sus correspondientes 2-pirrolidinonas, y su propuesta mecanística fue muy similar a la nuestra (Wang et al., 2020).

A pesar de estas sólidas evidencias computacionales, no se debería descartar el mecanismo por etapas, especialmente si se trata de sistemas estructuralmente restringidos, como la securinane

de Han y la cuscutamina nuestra; y mucho menos en contracciones de pirrolidinas a sus correspondientes β -lactamas. Estas últimas están siendo investigadas en nuestro laboratorio y próximamente serán divulgadas en una revista científica especializada. Sin embargo, podemos adelantar que este sistema es mucho más, no solo desafiante que las deconstrucciones de piperidinas, sino que también es más relevante debido a que las β -lactamas son fragmentos estructurales fundamentales en muchos antibióticos naturales o sintéticos.

Y aunque nos queramos librar de las molestas “adjetivaciones y superlativaciones”, no se puede evitar remarcar que esta nueva manera de editar el sistema *N*-heterociclo, especialmente el piperidínico, bajo condiciones libres de metales de transición, empleando disolventes no anhidros y en atmósferas terrestres, representa una excelente alternativa a los métodos tradicionales mediados por metales de transición. Además, con esta manera

“artesanal” de hacer síntesis orgánica nos aproximamos al inicio del quehacer de la síntesis orgánica misma, aquella que se hacía sin las condiciones y equipos sofisticados de reacción, aquella ciencia que se podría definir parafraseando un fragmento del poema del erudito escritor T. S. Eliot:

No nos cansaremos de explorar, porque al final de nuestra búsqueda, llegaremos al lugar donde todo empezó y lo conoceremos por primera vez.

(Eliot, 1943).

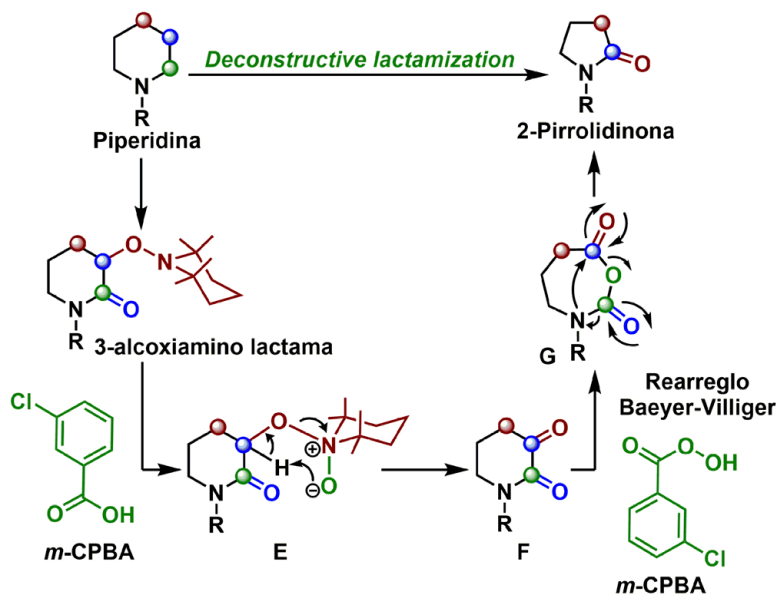


Figura 5. “Ring contraction” de 3-alcóxiamino lactama a 2-pirrolidinona.

G L O S A R I O

Alcaloide: los alcaloides son compuestos orgánicos de origen natural (aunque recientemente el término se ha extendido a los de origen sintético) que contienen en su estructura al menos un átomo de nitrógeno y, además, presentan algún efecto fisiológico.

Grupo director: grupo funcional que es adicionado a una molécula con la finalidad de que dirija una reacción química hacia una posición determinada en la molécula. Su uso es muy común en reacciones catalizadas por metales de transición.

Open flask: es un término en inglés que se utiliza para referirse a reacciones químicas que no requieren atmósfera inerte o condiciones anhidras.

Alcaloides indólicos: son aquellos alcaloides que presentan en su estructura el heterociclo indol.

Sistema cíclico: se refiere a una estructura molecular que contiene un anillo formado por átomos, los cuales, pueden ser únicamente carbono (carbociclo) o una mezcla de carbono con algún otro átomo (heterociclo).

Sistema cíclico-fusionado: se refiere a estructuras moleculares con dos o más ciclos interconectados entre sí.

Sistema tetracíclico-fusionado: se refiere a una estructura molecular con 4 ciclos fusionados.

Factores estéricos: se refiere a las fuerzas de repulsión entre las nubes electrónicas que afectan la conformación, la reactividad y la interacción de las moléculas debido a la disposición espacial de sus átomos.

Tensión angular: es la energía asociada a una molécula cuando los ángulos de enlace se desvían del ángulo ideal.

m-CPBA: acrónimo en inglés para referirse al reactivo *meta-chloroperoxybenzoic acid*, un agente oxidante utilizado como reactivo en la reacción de Baeyer-Villiger.

N O T A S

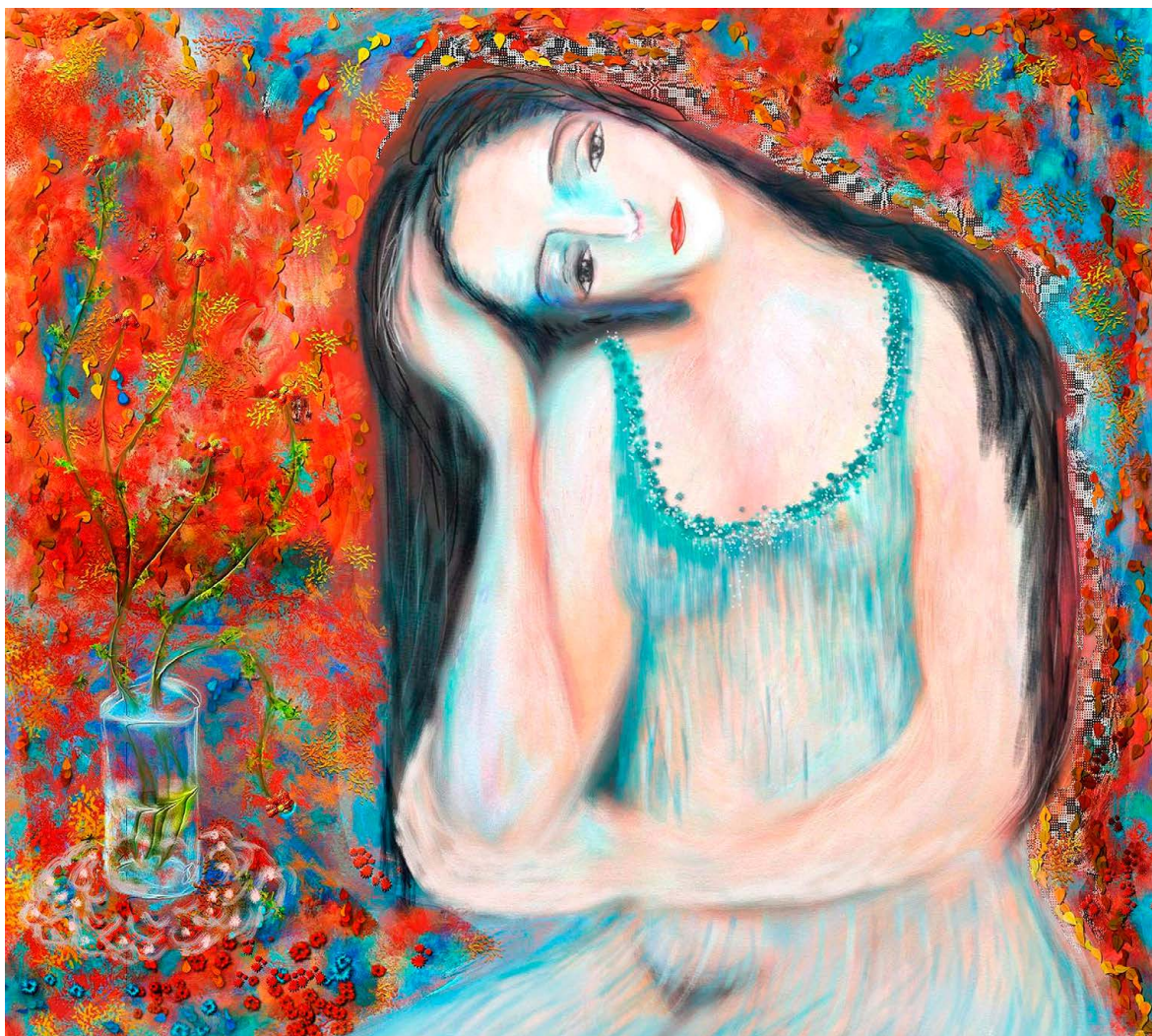
1 La triada oxidante se refiere a la mezcla de reactivos TEMPO (2,2,6,6-tetrametilpiperidina 1-oxi), NaClO₂ (clorito de sodio) e NaOCl (hipoclorito de sodio), son reactivos económicos y estables bajo condiciones atmosféricas, por lo tanto, su manipulación no requiere de condiciones especiales.

2 3-Alcoxiaminolactama es el nombre genérico del producto que se forma durante la reacción de doble oxidación y cuya estructura aparece en la Figura 3.

3 2-pirrolidinona es el nombre genérico del producto que se forma durante la reacción de deconstrucción/contracción y cuya estructura se muestra en la Figura 3.

4 Como se muestra en la Figura 4, durante el proceso de deconstrucción (*Sartillo-Piscil's ring contraction*) uno de los átomos de carbono del anillo de piperidina (el átomo marcado en verde) se pierde en forma de dióxido de carbono (CO₂) y ya no forma parte del producto final. Globalmente, este proceso representa una contracción de un anillo de seis átomos a uno de cinco átomos.

5 Una reacción concertada es aquella en donde todos los procesos de ruptura y formación de enlaces ocurren simultáneamente, en un solo paso y sin la formación de intermediarios.



© Malú Méndez Lavielle. *Turquesa*.

REFERENCIAS

- Corey EJ and Xue-Min C (1995). *The Logic of Chemical Synthesis*. John Wiley & Sons.
- Corey EJ, Schaaf TK, Huber W *et al.* (1970). Total Synthesis of Prostaglandins F₂α and E₂ as the Naturally Occuring Forms. *J. Am. Chem. Soc.* 92:397-398.
- Eliot TS (1943). *Four Quartets*. Harcourt.
- Jurczyk J, Woo J, Kim SF *et al.* (2022). Single-atom Logic for Heterocycle Editing. *Nat. Synth.* 1:352-364.
- López-Mendoza P, Meza-León RL and Sartillo-Piscil F (2025). The Art of Decorating Piperidine Scaffold into Alkaloid Precursors. *Tetrahedron* 178:134606.
- Ma C, Lindsley CW and Yu B (2024). Rational Molecular Editing: A New Paradigm in Drug Discovery. *J. Med. Chem.* 67:11459-11466.
- Osorio-Nieto U, Chamorro-Arenas D, Quintero L *et al.* (2016). Transition Metal-Free Selective Double sp³ C-H Oxidation of Cyclic Amines to 3-Alkoxyamine Lactams. *J. Org. Chem.* 81:8625-8632.
- Romero-Ibañez J, Cruz-Gregorio S, Sandoval-Lira J *et al.* (2019). Transition-Metal-Free Deconstructive Lactamization of Piperidines. *Angew. Chem. Int. Ed.* 58:8867-8871.
- Seoyoung K, Hee-Seung L and Sunkyu H (2024). Transformation of (allo) securinine to (allo) norsecurinine via a molecular editing strategy. *Front. Chem.* 12:1355636.
- Wang GW, Sokolova OO, Young TA *et al.* (2020). Carbonylative C–C Bond Activation of Aminocyclopropanes Using a Temporary Directing Group Strategy. *J. Am. Chem. Soc.* 142:19006-19011.

Fernando Sartillo-Piscil
Facultad de Ciencias Químicas
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
fernando.sartillo@correo.buap.mx

© Malú Méndez Lavielle. *Isadora*.



Bacterias y vainilla: del sustrato al aroma

Esmeralda **Escobar Muciño**

Cuando percibimos el dulce y reconfortante aroma de la vainilla, en realidad estamos detectando la acción de una sola molécula que se produce en grandes cantidades: la vainillina. Este compuesto natural, cuyo nombre químico es 3-metoxi-4-hidroxibenzaldehído, se encuentra en las vainas de la orquídea *Vanilla planifolia* y es el principal responsable del sabor y olor que han hecho de la vainilla uno de los ingredientes gastronómicos más apreciados en el mundo (Escobar-Muciño *et al.*, 2020).

Aunque solemos asociar la vainillina únicamente con las vainas de vainilla, esta sustancia también aparece en pequeñas cantidades en otras plantas. Desde el punto de vista químico, pertenece al grupo de los compuestos aromáticos fenólicos, una característica que explica su aroma intenso y su amplia utilidad. Gracias a estas propiedades, la vainillina se emplea de forma habitual como saborizante y fragancia en alimentos, bebidas, perfumes y productos farmacéuticos, donde además ayuda a suavizar olores o sabores no deseados (Banerjee y Chattopadhyay, 2019).

Junto a la vainillina, existe otro compuesto aromático conocido como el ácido vanílico o ácido 4-hidroxi-3-metoxibenzoico. Aunque su aroma es menos intenso, también forma parte del perfil aromático de la vainilla y ha despertado interés por sus posibles beneficios para la salud. Tanto la vainillina como el ácido vanílico presentan propiedades antioxidantes, antiinflamatorias, antimicrobianas

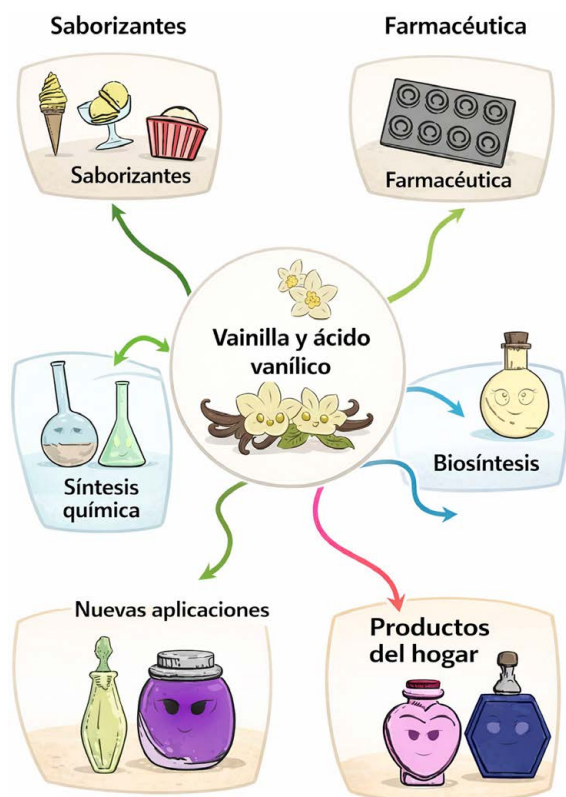


Figura 1. Usos y aplicaciones de la vainillina y el ácido vanílico en la industria de los alimentos, farmacéutica y perfumería.

y neuroprotectoras, lo que ha ampliado su valor más allá de la cocina y la perfumería. Hoy en día, estos compuestos no solo aportan sabor y aroma, también se utilizan como base para la elaboración de medicamentos, fragancias y aditivos alimentarios, demostrando en particular que las vainas de vainilla son mucho más que un simple ingrediente dulce: es una fuente de moléculas con aplicaciones sorprendentes en distintos ámbitos de la vida cotidiana (Figura 1) (Banerjee y Chattopadhyay, 2019).

Este valor sensorial y funcional ha convertido a la vainillina en uno de los compuestos aromáticos más importantes utilizados a nivel mundial. Sin embargo, la cantidad que se obtiene de forma natural es sorprendentemente limitada. La producción anual de vainillina extraída directamente de la vainilla natural se estima entre 66 y 2600 toneladas, que son concentradas principalmente en países como Indonesia, Madagascar, China, México, Tonga y Comoras (Gu *et al.*, 2015; Banerjee y Chattopadhyay,

2019). Esta cifra contrasta fuertemente con la demanda global, lo que genera una presión constante sobre los países productores. El cultivo de la vainilla es costoso y laborioso: requiere polinización manual, largos tiempos de maduración y ofrece una productividad relativamente baja, siendo factores que encarecen significativamente su producción (Banerjee y Chattopadhyay, 2019).

Para hacer frente a este desequilibrio entre oferta y demanda, se han desarrollado alternativas para asegurar el suministro de vainilla a escala industrial. Una de las más utilizadas es la síntesis química, mediante la cual se obtiene vainillina sintética a partir de compuestos derivados del petróleo, como el eugenol y guayacol (Zamzuri *et al.*, 2014; Banerjee y Chattopadhyay, 2019). Este tipo de producción está estrictamente regulada por agencias de seguridad alimentaria en todo el mundo, con el fin de garantizar su uso seguro en alimentos y otros productos de consumo humano (Banerjee y Chattopadhyay, 2019).

Frente a las limitaciones de la extracción natural y las preocupaciones asociadas a la síntesis química, ha surgido una alternativa que combina innovación, seguridad y sostenibilidad: la producción biotecnológica de vainillina natural. Este enfoque ha despertado un creciente interés en las industrias alimentarias y farmacéutica, ya que permite obtener vainillina a partir de procesos más respetuosos con el medio ambiente (Banerjee y Chattopadhyay, 2019).

Estos métodos se basan en el uso de enzimas provenientes de plantas y de microorganismos seguros, capaces de aprovechar residuos vegetales generados por distintas actividades industriales. En estos residuos se encuentran carbohidratos complejos que, al ser hidrolizados, liberan compuestos que funcionan como precursores de la vainillina. A través de una serie de reacciones enzimáticas cuidadosamente controladas. Precursores, como el ácido ferúlico, se transforman en vainillina y ácido vanílico. Entre las enzimas clave de este proceso destaca la feruloil esterasa, que participa activamente en la liberación de estos compuestos aromáticos (Ito *et al.*, 2006; Zamzuri *et al.*, 2014).

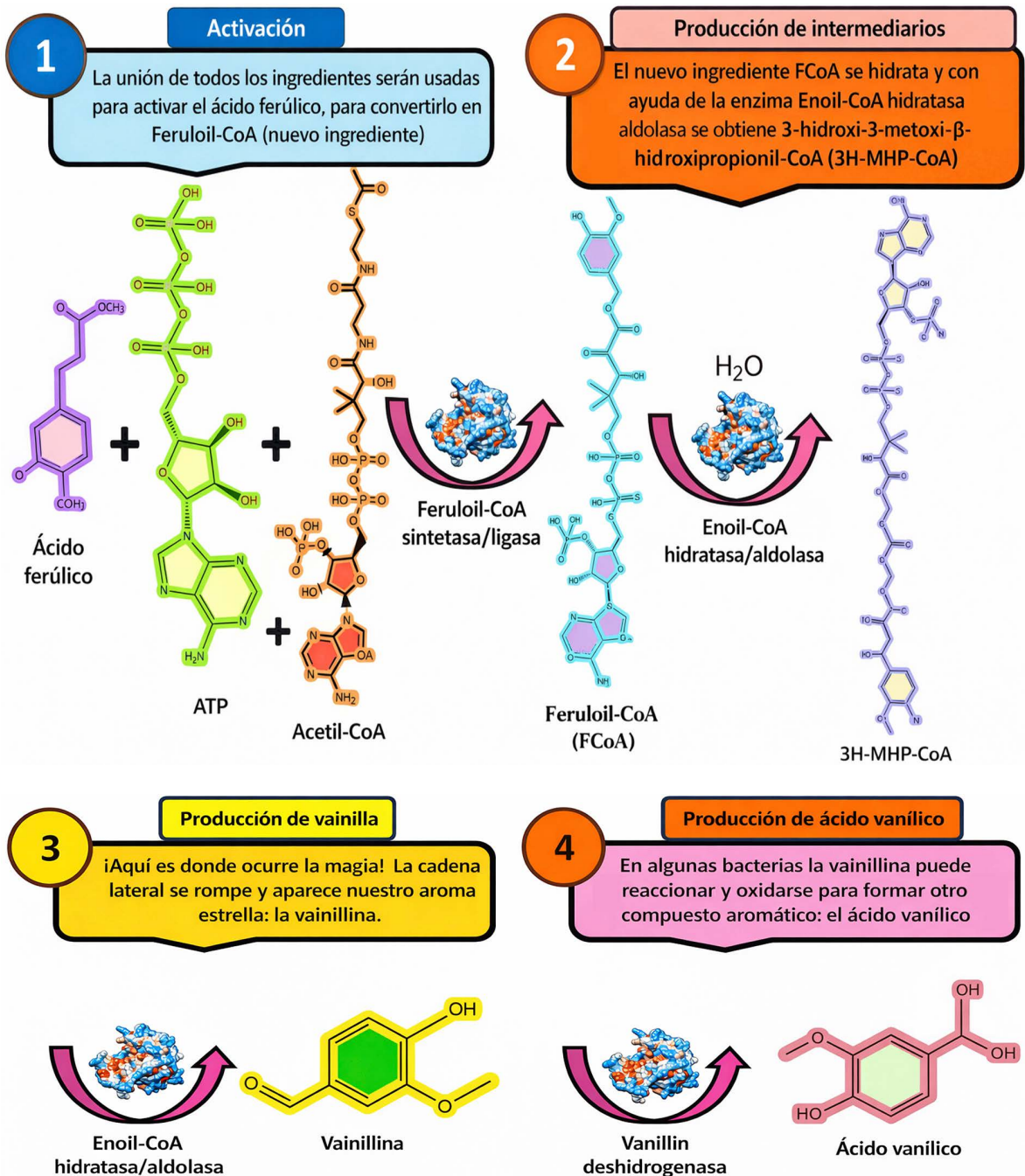


Figura 2. Representación didáctica de la ruta metabólica bacteriana dependiente de coenzima A (CoA) para la conversión del ácido ferúlico en vainillina y ácido vanílico. Inicialmente, el ácido ferúlico es activado y convertido en feruloil-CoA, que posteriormente es transformado mediante modificaciones de la cadena lateral, dando lugar a la vainillina; en algunas bacterias, esta puede oxidarse adicionalmente para formar ácido vanílico, un producto de degradación de la vainillina. La figura se basa en el trabajo de Ito *et al.*, 2006.

Para que estos procesos sean viables y seguros, es esencial emplear sustratos de grado alimenticio y microorganismos que no representen riesgos para la salud humana o animal. De esta manera, la biotecnología no solo permite satisfacer la creciente demanda de vainillina, sino que también ofrece una solución alineada con los principios

de sostenibilidad y economía circular, al dar valor a materiales que de otro modo serían considerados desechos (Banerjee y Chattopadhyay, 2019).

En el contexto de la bioconversión microbiana, esta se presenta como una de las estrategias más

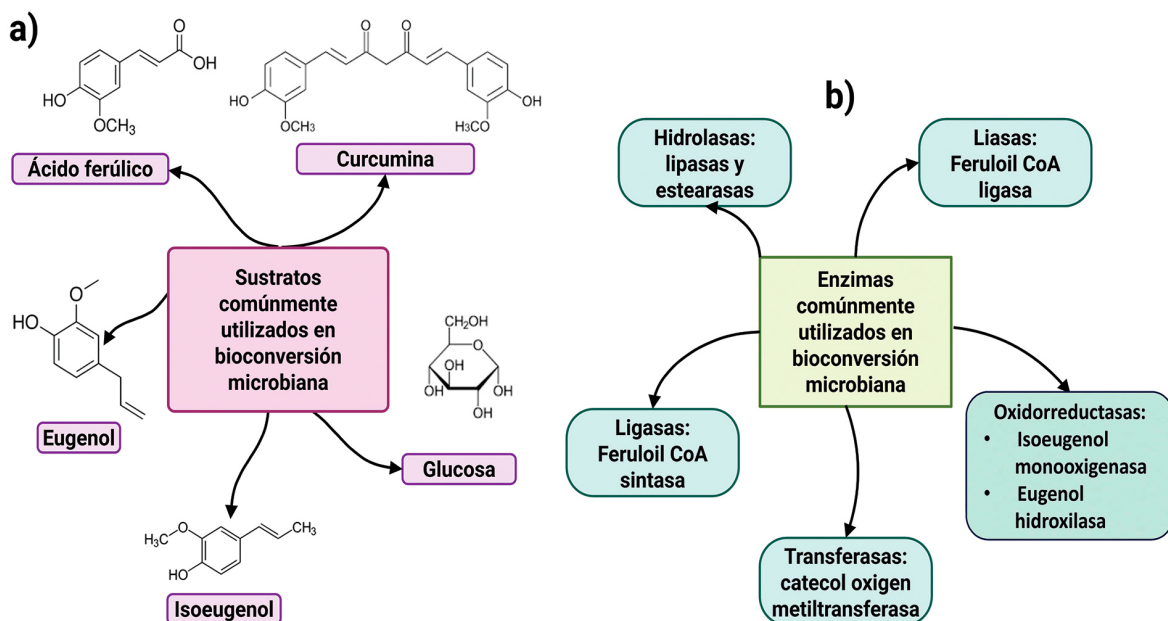


Figura 3. Sustratos y enzimas más utilizados en la producción de vainillina natural usando microorganismos. Figura diseñada en BioRender bajo una licencia institucional.

prometedoras dentro de la producción biotecnológica de la vainillina. Este enfoque aprovecha la capacidad metabólica de microorganismos para transformar compuestos naturales en productos de alto valor agregado, como la vainillina y el ácido vanílico, a través de procesos de biotransformación (Zamzuri *et al.*, 2014; Gu *et al.*, 2015; Escobar-Muciño *et al.*, 2020). Este tipo de procesos ofrece ventajas relevantes, entre ellas la reducción del impacto ambiental, el uso de condiciones de operación suaves y la posibilidad de emplear residuos vegetales como materia prima, contribuyendo así a un enfoque más sostenible en la obtención de compuestos aromáticos de interés industrial (Banerjee y Chattopadhyay, 2019).

COMO NACE EL AROMA DE LA VAINILLA: EL ÁCIDO FERÚLICO COMO PRECURSOR CLAVE

El ácido ferúlico, también conocido como ácido 4-hidroxí-3-metoxicinámico es uno de los precursores más importantes en la producción biotecnológica de la vainillina y el ácido vanílico de origen natural. Este compuesto se encuentra de forma abundante en la pared celular de frutas, cereales y otros materiales

vegetales, donde forma parte de estructuras complejas. Gracias a su estructura química, el ácido ferúlico puede transformarse en vainillina mediante rutas enzimáticas específicas que involucran enzimas como ferulasas, descarboxilasas y aldehído deshidrogenasas. En la Figura 2 se muestran los pasos sencillos de la conversión del ácido ferúlico en vainillina y, posteriormente, en ácido vanílico como una receta que culmina en la formación de sabores agradables.

La amplia disponibilidad del ácido ferúlico en residuos agroindustriales lo convierte en una alternativa atractiva desde el punto de vista económico y ambiental, alineada con estrategias de producción sostenible (Ito *et al.*, 2006; Banerjee y Chattopadhyay, 2019). En este proceso, los microorganismos desempeñan un papel clave al actuar como verdaderas fábricas biológicas capaces de convertir compuestos aromáticos de origen vegetal en vainillina. Además del ácido ferúlico, otros sustratos como el eugenol y los residuos agrícolas lignocelulósicos también pueden ser aprovechados mediante rutas metabólicas bien definidas. Diversos microorganismos han demostrado una alta eficiencia en estas transformaciones, incluyendo bacterias y hongos que realizan la biosíntesis de vainillina a través de uno o dos pasos enzimáticos. Entre los géneros más

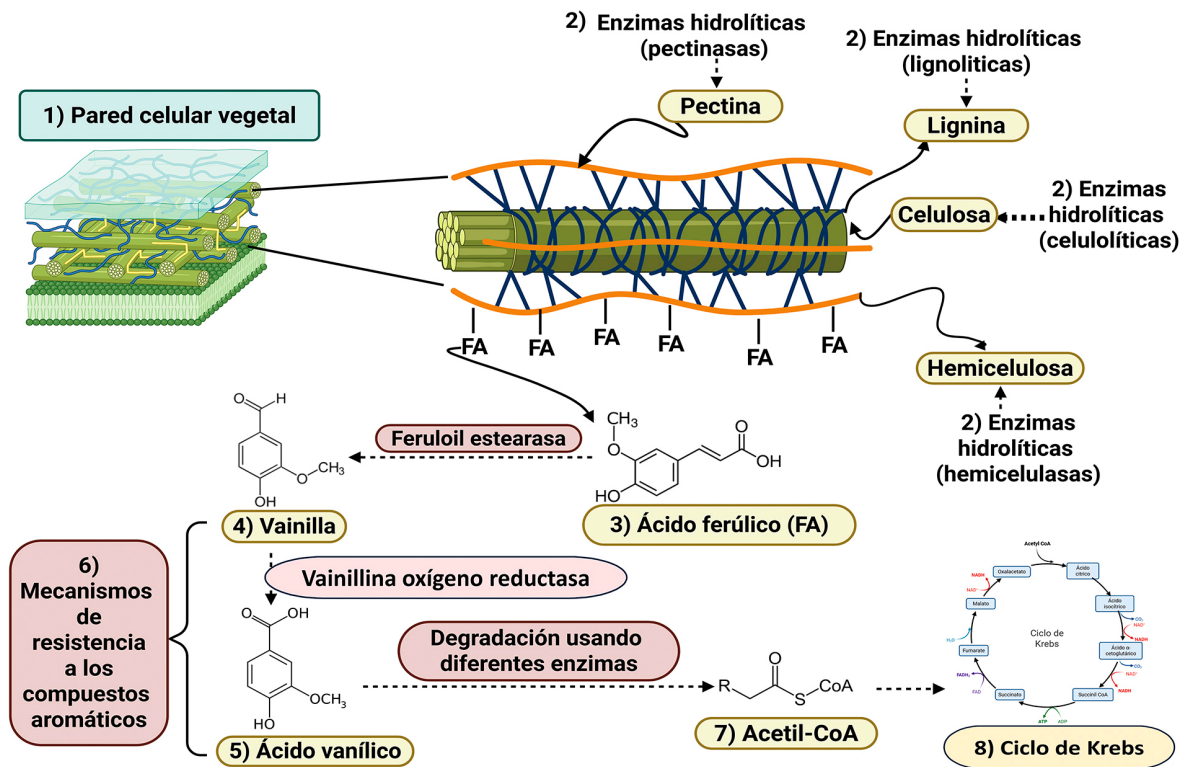


Figura 4. Procesos bacterianos involucrados en la transformación del ácido ferúlico en vainilla y ácido vanílico (Ito *et al.*, 2006; Escobar-Muciño *et al.*, 2020). La figura muestra cómo, a partir de la degradación de la pared celular vegetal por acción de enzimas, se inicia una serie de reacciones bioquímicas en las bacterias que conducen a la formación de estos compuestos aromáticos. Como parte final del proceso, se genera la acetil-CoA, una molécula que se integra al metabolismo energético de la célula. Figura diseñada en BioRender bajo una licencia institucional.

estudiados se encuentran *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Streptomyces* y *Amycolatopsis*, reconocidos por su eficacia y frecuencia de uso (Banerjee y Chattopadhyay, 2019; Escobar-Muciño *et al.*, 2021).

A esta lista se suman bacterias ácido-lácticas como *Pediococcus*, hongos ligninolíticos como *Phanerochaete* y bacterias ambientales pertenecientes a géneros como *Sphingomonas* y *Halomonas*. Esta diversidad microbiana pone de manifiesto el amplio potencial biotecnológico de los microorganismos para la producción de compuestos aromáticos de alto valor industrial, como la vainillina. En la Figura 3 se ilustran los principales sustratos y enzimas involucradas en los procesos de bioconversión microbiana que conducen a la formación de vainillina y ácido vanílico (Banerjee y Chattopadhyay, 2019; Escobar-Muciño *et al.*, 2021).

Dentro de esta diversidad microbiana, algunos de los microorganismos que más interés han despertado entre los investigadores pertenecen al género *Pseudomonas*. Diversas cepas de este grupo han

sido estudiadas por su capacidad para transformar compuestos fenólicos en moléculas de interés industrial, entre ellas *Pseudomonas* sp. Az10 UPM, *P. fluorescens* AN103, *P. putida* y *P. aeruginosa* IF-VB. Estas bacterias son capaces de producir ácido vanílico, un compuesto que, como se ha señalado previamente, forma parte del perfil aromático característico de las vainas de vainilla natural (Zamzuri *et al.*, 2014; Escobar-Muciño *et al.*, 2020).

La bioconversión realizada por estas cepas ocurre a partir del ácido ferúlico bajo condiciones de fermentación controladas, generalmente a temperaturas entre 25-30°C, pH cercano a la neutralidad. Estos procesos se llevan a cabo en volúmenes relativamente pequeños, que van de 20 a 200 ml, lo que facilita su estudio en condiciones de laboratorio. En esta ruta metabólica participa una enzima clave, la vainillina deshidrogenasa, responsable de oxidar la vainillina y convertirla en ácido vanílico, marcando un lapso fundamental

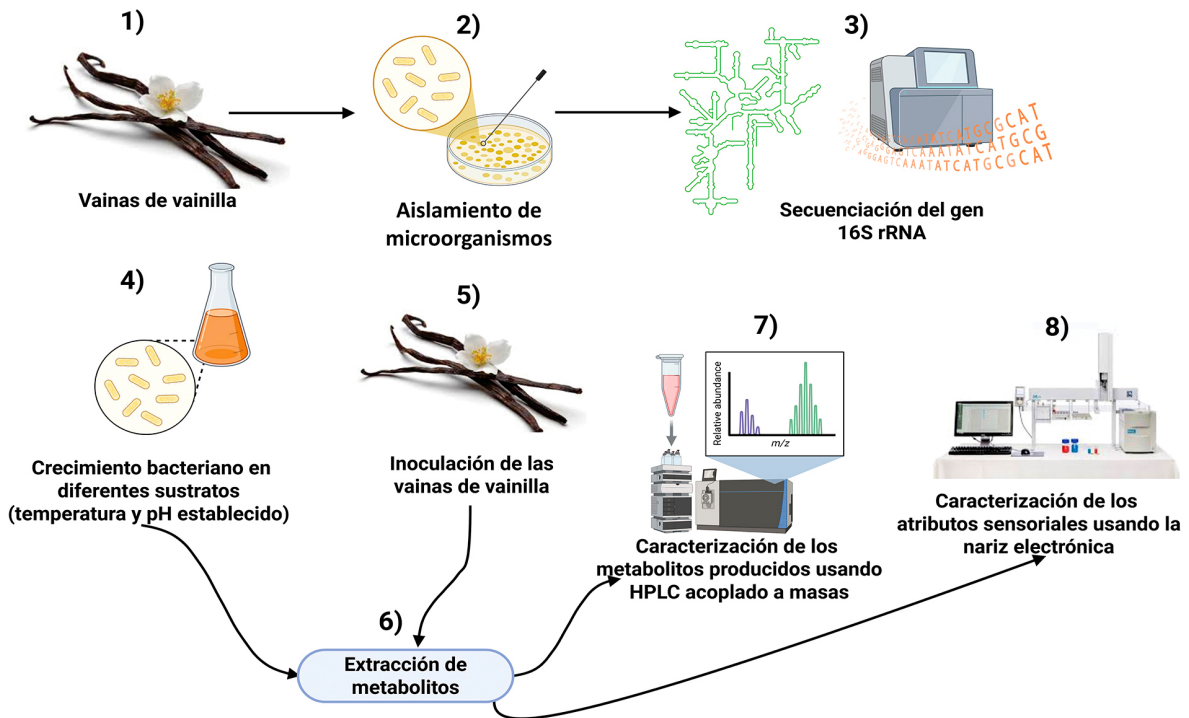


Figura 5. Esquema del proceso de producción natural de compuestos aromáticos por bacterias tanto en condiciones de cultivo *in vitro* como mediante la inoculación directa de las vainas de *V. planifolia* durante el proceso de curado. El procedimiento incluye el aislamiento e identificación molecular de las bacterias, su cultivo en presencia de ácido ferúlico como precursor, la detección de vainillina y ácido vanílico por HPLC-MS, así como el análisis del perfil aromático en las vainas mediante nariz electrónica (Gu *et al.*, 2015; Escobar-Muciño *et al.*, 2020; Manyatsi *et al.*, 2024). Figura diseñada en BioRender bajo una licencia institucional.

dentro del procesos de transformación microbiana (Zamzuri *et al.*, 2014; Escobar-Muciño *et al.*, 2020).

En la Figura 4 se representa de manera esquemática el proceso de bioconversión bacteriana del ácido ferúlico en vainillina y ácido vanílico. El mecanismo inicia con la degradación de la pared celular vegetal, que puede ser llevada a cabo tanto por enzimas hidrolíticas propias de la planta como por enzimas producidas por las bacterias. Posteriormente, entran en acción las enzimas específicas de la bioconversión bacteriana, que conducen a la formación de intermediarios metabólicos y, finalmente, de acetil-CoA, el cual puede reincorporarse al ciclo de Krebs como parte del metabolismo energético celular (Ito *et al.*, 2006).

Un aspecto clave para la selección de bacterias con potencial biotecnológico es su resistencia al efecto antimicrobiano de la vainillina, el ácido ferúlico y otros compuestos intermediarios generados durante el proceso. Esta tolerancia ha sido previamente demostrada en distintas cepas y resulta esencial para

garantizar una producción eficiente bajo condiciones de laboratorio, ya que la acumulación de estos compuestos puede inhibir el crecimiento microbiano y limitar el rendimiento del proceso (Ito *et al.*, 2006; Escobar-Muciño *et al.*, 2020).

En conjunto, estos resultados indican que algunas cepas no solo pueden colonizar tejidos vegetales, sino también iniciar la degradación de la pared celular y aprovechar los compuestos liberados para producir aromas característicos. La capacidad de resistir los propios compuestos que generan es un aspecto clave, ya que permite que el proceso continúe sin inhibir el crecimiento bacteriano. Por estas razones, estas bacterias se consideran candidatas ideales para aplicaciones en biotecnología del aroma (Escobar-Muciño *et al.*, 2020 y 2021). La Figura 6 ilustra el enfoque de la bioprospección enzimática, es decir, la búsqueda de microorganismos que producen enzimas con aplicaciones biotecnológicas útiles en el contexto de los aromas. En este caso, la bioprospección es utilizada para identificar bacterias capaces de generar sus propios sustratos por la hidrólisis de componentes

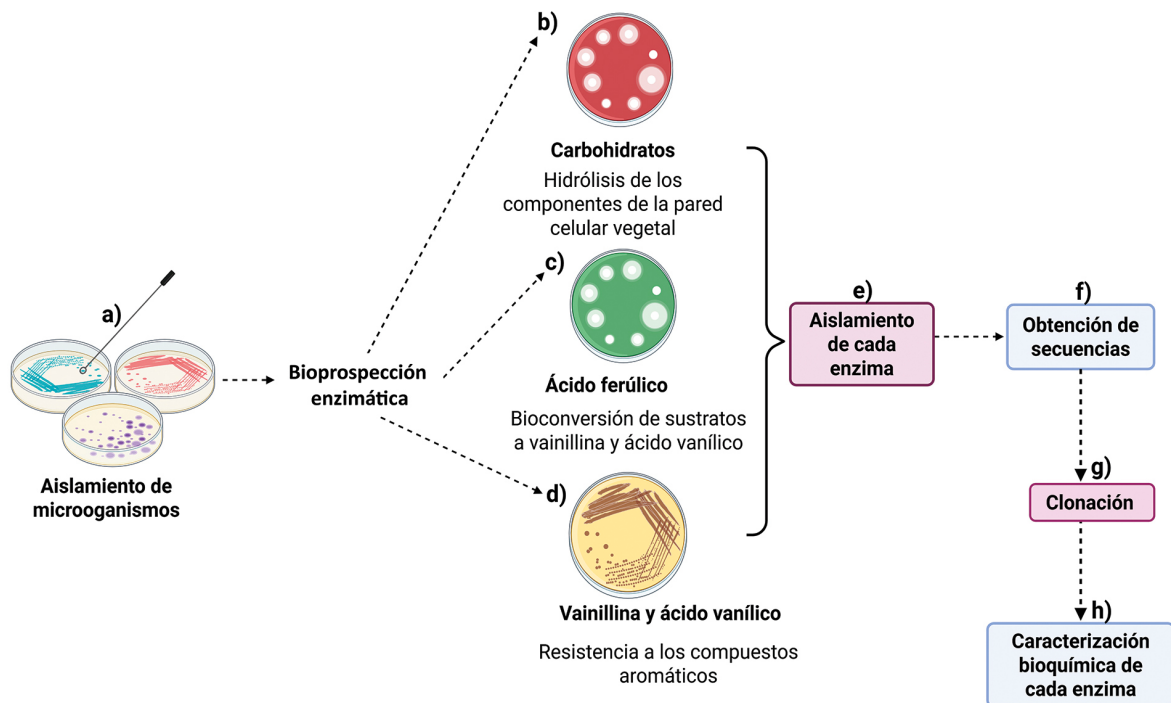


Figura 6. Bioprospección de bacterias con capacidad para transformar materiales vegetales en compuestos aromáticos naturales. La figura ilustra cómo estos microorganismos degradan el tejido vegetal, producen moléculas aromáticas y toleran los compuestos generados, lo que los convierte en candidatos para aplicaciones biotecnológicas (Gu *et al.*, 2015; Escobar-Muciño *et al.*, 2020; Dos Santos *et al.*, 2022). Figura diseñada en BioRender bajo una licencia institucional.

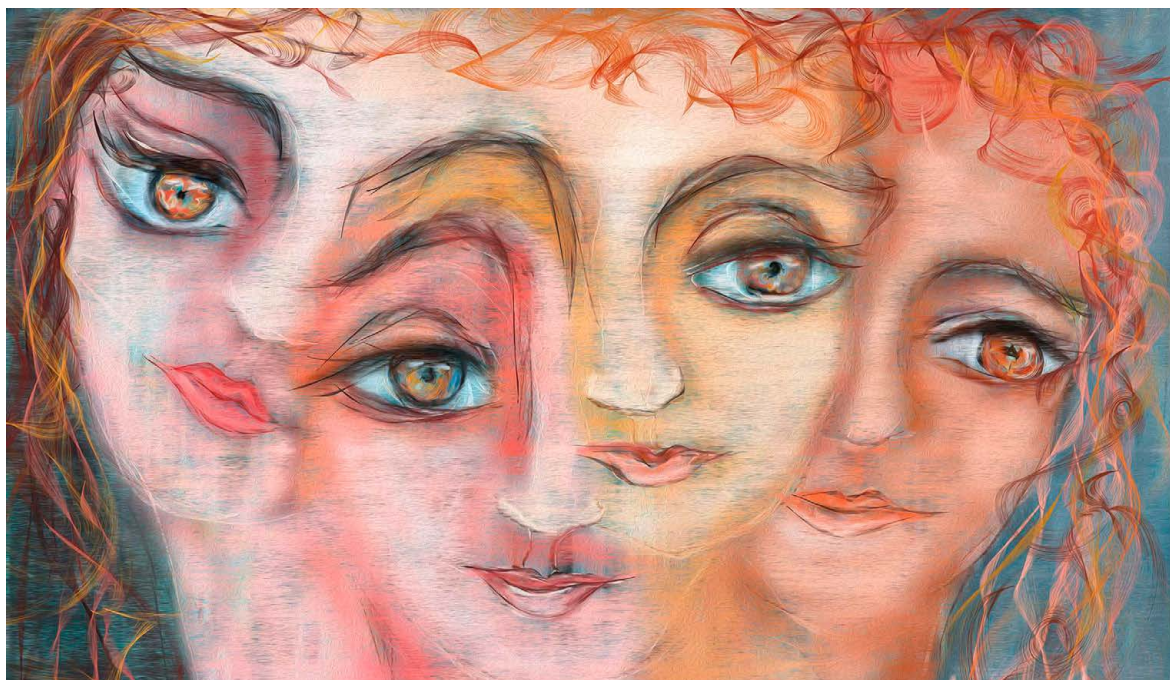
de la pared celular vegetal, producir compuestos aromáticos por bioconversión bacteriana a partir de precursores como el ácido ferúlico y presentar mecanismos de resistencia a compuestos aromáticos resultantes, como la vainillina y el ácido vanílico.

VAINILLINA Y ÁCIDO VANÍLICO: DEL LABORATORIO A LA INDUSTRIA

Producir vainillina y ácido vanílico a partir de fuentes naturales es una alternativa cada vez más atractiva frente a los métodos químicos tradicionales, especialmente por su menor impacto ambiental. Sin embargo, llevar estos procesos del laboratorio a la industria no es sencillo. A diferencia de la producción química, que se realiza bajo condiciones estrictamente controladas, la producción biológica depende de organismos vivos, cuya actividad está influida por factores como la temperatura, el tipo de nutriente disponible, las condiciones de cultivo y las rutas enzimáticas disponibles en cada microorganismo (Ito *et al.*, 2006; Zamzuri *et al.* 2014).

Algunos microorganismos han demostrado una notable capacidad para transformar el ácido ferúlico en ácido vanílico o vainillina. Estudios como el de Zamzuri *et al.* (2014) han mostrado que ciertas bacterias del género *Pseudomonas* pueden realizar esta transformación de manera eficiente. No todas las cepas se comportan igual: algunas producen mayores cantidades, otras actúan más rápido y en otros casos son más eficientes, lo que muestra que cada microorganismo tiene ventajas particulares (Zamzuri *et al.* 2014; Gu *et al.*, 2015; Escobar-Muciño *et al.*, 2020 y 2021).

En el caso de la vainillina, los métodos biotecnológicos todavía producen cantidades menores que la síntesis química. Sin embargo, su gran fortaleza radica en el uso de materias primas renovables y en su aceptación como producto de origen natural. De hecho, investigaciones recientes han logrado avances importantes utilizando bacterias modificadas genéticamente, capaces de producir cantidades relevantes de vainillina en poco tiempo (Zamzuri *et al.* 2014; Liziatelli *et al.* 2019).



© Malú Méndez Lavielle. *Derostros*.

Uno de los mayores desafíos es que tanto el material de partida como los compuestos aromáticos producidos pueden resultar tóxicos para los propios microorganismos. Esto limita los rendimientos que pueden obtenerse en un solo proceso (Zamzuri *et al.* 2014; Gu *et al.*, 2015). Para superar este problema, los científicos trabajan en la búsqueda de métodos que permitan seleccionar bacterias resistentes (Escobar-Muciño *et al.*, 2020).

En conjunto, aunque estos métodos aún no sustituyen a la producción química tradicional, representan una alternativa prometedora. La posibilidad de obtener vainillina y ácido vanílico de origen natural a partir de residuos vegetales y con menor impacto ambiental, posiciona a la biotecnología como una opción clave para el futuro de la industria de los aromas (Liziatelli *et al.* 2019).

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

El aroma de la vainilla es el resultado de un sistema biológico mucho más complejo de lo que comúnmente se imagina. Lejos de depender únicamente de la

planta *V. planifolia* o de una sola molécula, como la vainillina, este aroma surge de la interacción entre compuestos vegetales y microorganismos que habitan naturalmente en las vainas. Comprender esta relación ha permitido reconocer a las bacterias como actores clave en la formación y enriquecimiento del perfil aromático de la vainilla natural.

A lo largo de este trabajo se muestra que la bioconversión microbiana del ácido ferúlico representa una alternativa sostenible para la obtención de vainillina y ácido vanílico, dos compuestos de alto valor en las industrias alimentaria, cosmética y farmacéutica. Microorganismos pertenecientes a géneros como *Pseudomonas* y *Bacillus* destacan por su capacidad para transformar precursores de origen vegetal en moléculas aromáticas, así como por su tolerancia a condiciones que resultan desafiantes para otros organismos. En particular, las bacterias del género *Bacillus* sobresalen por su habilidad para colonizar tejidos vegetales, degradar la pared celular de la planta y aprovechar los compuestos liberados para la producción de aromas característicos.

Un aspecto central que emerge de estos estudios es la importancia de identificar cepas microbianas con múltiples capacidades complementarias. Para

que un organismo sea realmente útil en la producción biotecnológica de aromas, no solo debe ser capaz de convertir el ácido ferúlico en vainillina o ácido vanílico, sino también de romper la pared celular vegetal para acceder a los sustratos y resistir las propiedades antimicrobianas de la propia vainillina. En este contexto, el desarrollo de métodos de *screening* o selección temprana de cepas resulta fundamental. Estas estrategias permiten evaluar de manera rápida y eficiente que microorganismos combinan la producción enzimática adecuada, la capacidad de bioconversión y la tolerancia a compuestos aromáticos, optimizando la búsqueda de candidatos con verdadero potencial biotecnológico.

Desde una perspectiva ambiental y económica, el aprovechamiento de residuos agroindustriales ricos en ácido ferúlico representa una oportunidad clara para fortalecer la sostenibilidad del proceso. El uso de subproductos vegetales no solo reduce costos, sino que también transforma desechos en materias primas valiosas, alineando la producción de aromas naturales con los principios de la economía circular.

Si bien la producción microbiana de vainillina y ácido vanílico aún no alcanza los volúmenes de la síntesis química tradicional, su valor radica en la posibilidad de obtener compuestos de origen natural, con menor impacto ambiental y mayor aceptación por parte de los consumidores. Las perspectivas futuras apuntan a la optimización de cepas, al diseño de procesos de fermentación más eficientes y al fortalecimiento de estrategias de selección microbiana, que permitan avanzar del laboratorio hacia aplicaciones industriales.

En conjunto, la biotecnología microbiana se perfila como una herramienta clave para el futuro de la industria de los aromas. Al integrar conocimientos sobre microbiología, química y sostenibilidad, se abre la puerta a nuevas formas de producir vainillina y ácido vanílico, demostrando que detrás del aroma dulce y familiar de la vainilla existe un sofisticado mundo microbiano con un enorme potencial por explotar.

AGRADECIMIENTOS

Al SECIHTI, por el otorgamiento de la beca de estancia postdoctoral (CVU: 406969). Asimismo, se

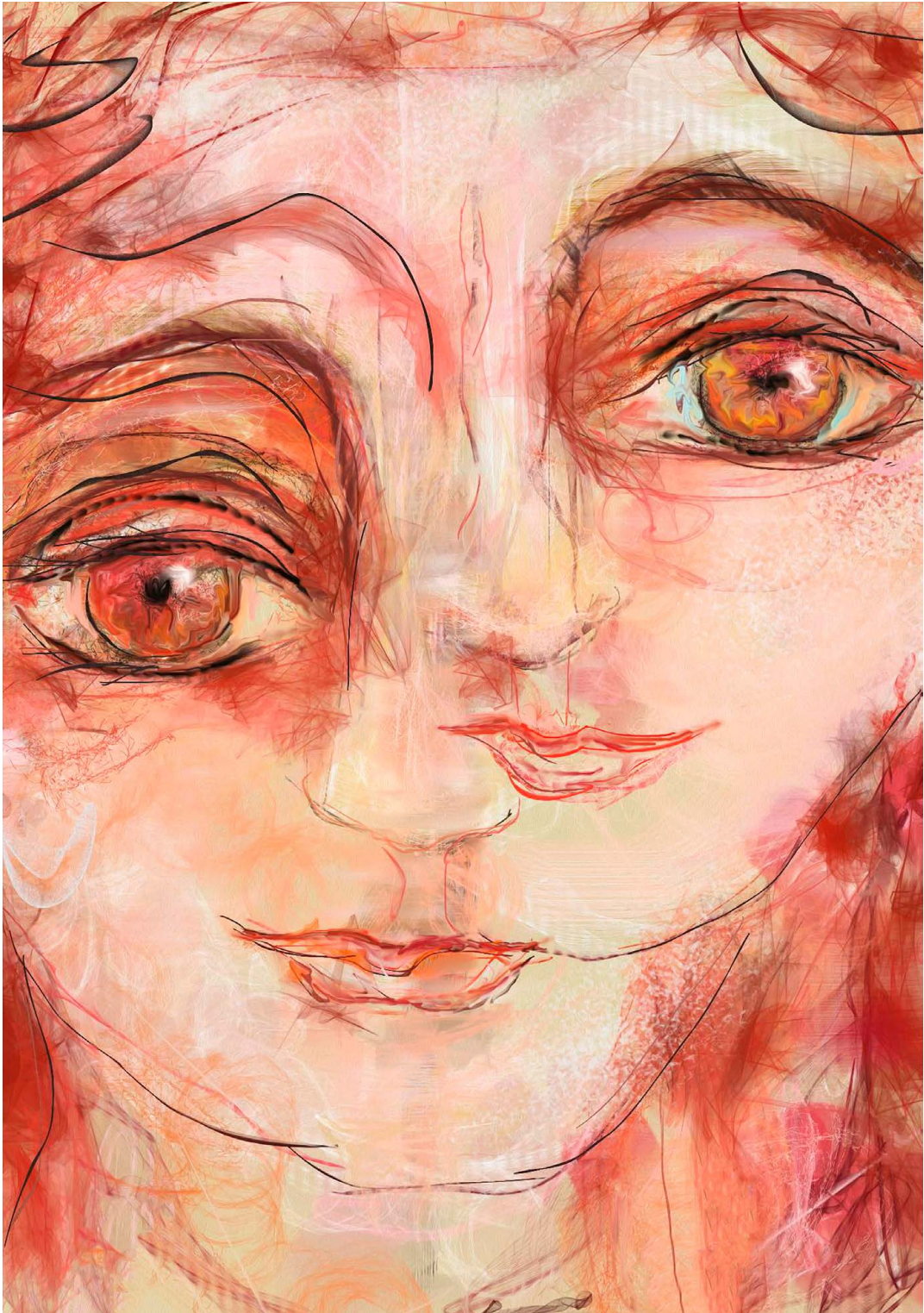
agradece a la ingeniera en mecatrónica Estrella Escobar Muciño por el diseño y la elaboración de las imágenes incluidas en este trabajo.

R E F E R E N C I A S

- Banerjee G and Chattopadhyay P (2019). Vanillin biotechnology: the perspectives and future. *Journal of The Science of Food and Agriculture* 99(2):499-506.
- Escobar-Muciño E, Arenas-Hernández MM and Luna-Guevara ML (2021). Screening of pectinolytic activity and bioconversion of ferulic acid to aromatic compounds from *B. cereus* IFVB and *B. subtilis* IFVB isolated mexican vanilla (*Vanilla planifolia* ex. Andrews) beans from the curing process. In *International Conference on Applied Science and Advanced Technology* (pp. 93-106). Cham: Springer International Publishing.
- Zamzuri NA, Abd-Aziz S, Rahim RA et al. (2014). A rapid colorimetric screening method for vanillic acid and vanillin-producing bacterial strains. *Journal of Applied Microbiology* 116(4):903-910.
- Escobar-Muciño E, Luna-Guevara ML, Ramos-Cassellis ME et al. (2020). Evaluation of process involved in the production of aromatic compounds in Gram-negative bacteria isolated from vanilla (*Vanilla planifolia* ex. Andrews) beans. *Journal of Applied Microbiology* 128(4):1086-1098.
- Ito N, Itakura M, Eda S et al. (2006). Global gene expression in *Bradyrhizobium japonicum* cultured with vanillin, vanillate, 4-hydroxybenzoate and protocatechuate. *Microbes and Environments* 21(4):240-250.
- Hariom, Shyamala BN, Prakash M and Bhat KK (2006). Vanilla flavor evaluation by sensory and electronic nose techniques. *Journal of Sensory Studies* 21(2):228-239.
- Gu F, Chen Y, Fang Y et al. (2015). Contribution of *Bacillus* isolates to the flavor profiles of vanilla beans assessed through aroma analysis and chemometrics. *Molecules* 20(10):18422-18436.
- Manyatsi TS, Lin YH and Jou YT (2024). The isolation and identification of *Bacillus velezensis* ZN-S10 from vanilla (*V. planifolia*), and the microbial distribution after the curing process. *Scientific Reports* 14(1):1-14.
- Dos Santos OAL, Goncalves TA, Sodre V et al. (2022). Recombinant expression, purification and characterization of an active bacterial feruloyl-CoA synthase with potential for application in vanillin production. *Protein Expression and Purification* 197:1-7.
- Luziatelli F, Brunetti L, Ficca AG and Ruzzi M (2019). Maximizing the efficiency of vanillin production by biocatalyst enhancement and process optimization. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 7:279.

Esmeralda Escobar Muciño
Instituto Potosino de Investigación Científica
y Tecnológica A.C.
eemmicrobio2025@gmail.com

© Malú Méndez Lavielle. *Rostros.*



De los patios familiares a los corredores biológicos: reptiles y vegetación ribereña en México

Marco T. **Oropeza-Sánchez**
Roberto **Munguía-Steyer**

“Pásale el cabo del hacha a tu tía, y tú, idale en la cabeza! En el cuerpo no, porque no se muere”. Fueron las palabras de mi abuelita. Desde que tengo uso de memoria, tanto ella como sus hijos (mis tíos) sentían aversión y hasta terror por unas lagartijas que frecuentaban su casa, a las cuales llamaban escorpiones. Con la idea de que estos animales eran venenosos, en mi infancia fui testigo de cómo muchos de ellos murieron a palos. No fue hasta la universidad que me enteré de que, en México, las especies de lagartijas venenosas se pueden contar con una mano (los monstruos de Gila, del género *Heloderma*. Figura 1) y no se parecen en nada al escorpión (*Barisia imbricata*. Figura 2).

De haber investigado un poco en esos tiempos, tal vez me hubiera topado con esta información y se habría evitado tanta matanza. No obstante, hoy en día existen otras amenazas para las lagartijas y los reptiles en general, y de quedarnos con los brazos cruzados seremos testigos de una catástrofe de escala mayor a la de los patios de nuestras abuelas.



Figura 1. Monstruo de Gila (género *Heloderma*). Ilustración por Héctor Hernández Zavala.

LOS REPTILES: SUS CARACTERÍSTICAS Y SUS FUNCIONES

El llamado escorpión (*Barisia imbricata*) pertenece al grupo de los reptiles, animales que podemos identificar por presentar características particulares. Los reptiles tienen escamas que protegen su piel (similares a las de los peces) y nacen de huevos con una cubierta calcificada (como las aves). Si las crías salen del cascarón (eclosionan) después de que los huevos son depositados, se les denomina animales ovíparos, y si eclosionan dentro de las hembras, se les reconoce como vivíparos.

A los reptiles se les denomina animales ectotermos porque, al contrario de los mamíferos y las aves, casi no tienen capacidad de generar calor corporal y dependen de las condiciones de su entorno para regular su temperatura. Debido a esta característica, pueden adoptar comportamientos como permanecer o moverse en áreas “abiertas” con mucha luz solar, o posarse en rocas o tierra que irradian calor con la finalidad de regular la temperatura de su cuerpo.

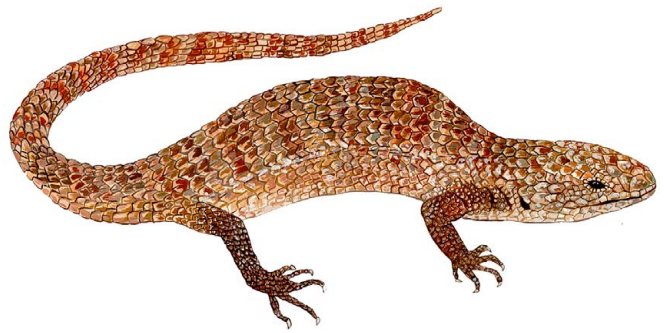
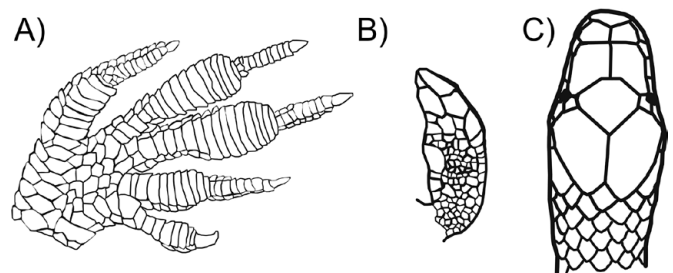


Figura 2. Escorpión (*Barisia imbricata*). Ilustración por la bióloga Erandi Monroy Hernández.

Para no calentarse demasiado, a veces observamos a las lagartijas despegar su vientre de las superficies para generar corrientes de aire fresco (“hacen lagartijas”). Por esta característica, uno creería que todos los reptiles deberían limitar sus actividades al suelo abierto donde abundan las rocas, pero la verdad es que los reptiles son uno de los grupos de animales más diversos en especies, formas y hábitats.

Los reptiles poseen una gran diversidad de características que les permiten desplazarse en tierra, árboles y agua. Por ejemplo, las especies que suelen trepar árboles poseen dedos con puntas ensanchadas, como las lagartijas de abanico (del género *Anolis*; Figura 3A). Aquellas que frecuentan el agua suelen tener patas palmeadas (como los patos; por ejemplo, los cocodrilos y tortugas) o sus miembros se asemejan a aletas (Figura 3B). Hay especies que prefieren vivir en fosas bajo tierra y poseen patas cortas o una cabeza con forma especial que sirve para excavar (como la cabeza en forma de cuña de las culebras mineras, pertenecientes al género *Geophis*; Figura 3C).

Figura 3. Miembros especializados en reptiles, adaptados para vivir en diferentes ambientes. A) Pata delantera de lagartija de abanico; B) aleta de tortuga marina; C) cabeza en forma de cuña de las culebras mineras. Ilustraciones por la bióloga Erandi Monroy Hernández..



Por la gran variedad de formas que han desarrollado al adaptarse a diferentes ambientes, los reptiles cumplen papeles muy importantes en los ecosistemas. Algunas lagartijas y serpientes comen y regulan poblaciones de insectos y roedores que pueden representar plagas para los cultivos de importancia económica. Esta función es reconocida por don Longino, agricultor de Indaparapeo, Michoacán, quien nos expresó:

Yo ya no mato las culebras porque vi que se comen a los ratones; estos seguidos aparecían en el alimento de las vacas. Pero ahora ya no encuentro los animales en el alimento, yo creo que es porque ya no macheteo las culebras.

Las funciones de los reptiles no se limitan a consumir insectos y roedores; algunas especies pueden fomentar la salud de poblaciones humanas. Especies como las tortugas y cocodrilos pueden consumir animales en descomposición (carroña), controlando así los residuos que pueden generar enfermedades. Incluso existen reptiles de importancia médica que pueden ayudarnos a superar enfermedades de gran prevalencia. Por ejemplo, a partir de la saliva del monstruo de Gila (*Heloderma suspectum*) se desarrolló la exenatida, un medicamento empleado para tratar la diabetes tipo 2. Asimismo, a partir del veneno de la serpiente amazónica (*Bothrops jararaca*) se creó el captopril, enfocado en tratar problemas de hipertensión arterial, una enfermedad común en México. Por lo tanto, si no queremos privarnos de los beneficios de los reptiles, es necesario informarnos sobre lo que está amenazando a sus poblaciones, tomar conciencia y tratar de coexistir sin dañarlos.

AMENAZAS A LOS REPTILES

Al igual que sucede con los anfibios, aves y mamíferos, la pérdida de hábitat por cambio de uso de suelo pone en riesgo a distintas poblaciones de reptiles. El cambio de uso de suelo se genera cuando los seres humanos destruimos los bosques y selvas y establecemos en su lugar áreas de cultivo,

pastizales para ganado o zonas inmobiliarias, con lo que reducimos los espacios y recursos necesarios para que las poblaciones silvestres puedan subsistir (para más información sobre este tema se puede consultar Oropeza-Sánchez *et al.* 2024).

Una vez que los reptiles ven destruidos sus hábitats, se ven obligados a adoptar nuevos refugios. Entre las opciones de los reptiles frente al cambio de uso de suelo, está mudarse a espacios similares a los de su origen o adentrarse en ambientes nuevos dominados por la humanidad; por ejemplo, las ciudades. Al contar con una limitada cobertura de árboles, algunas especies de reptiles (no todas) encuentran agradables las áreas urbanas dominadas por concreto, donde pueden regular fácilmente su temperatura corporal. No obstante, en México y varias partes del mundo, igual que en la casa de mi abuelita, la gente considera a los reptiles como animales peligrosos por la presencia de veneno en algunas especies, o simplemente por algunos mitos. Algo bastante trágico, ya que culturalmente nuestros antepasados apreciaban e incluso adoraban deidades que hacían alusión a los reptiles (como Quetzalcóatl).

Paradójicamente, hoy en día el aprecio desmedido de algunas personas por los reptiles puede ser más un mal que algo positivo. La compra de especies exóticas como mascotas y las colecciones privadas de ejemplares vivos han catapultado la extracción, venta y contrabando ilegal de animales silvestres. Este negocio afecta de manera especial a los reptiles, ya que en 2020 se estimó que 35 % de las especies comercializadas en internet se encuentran en riesgo de extinción (Marshall *et al.* 2020). Además, 79 % de las especies de reptiles comercializadas no están consideradas dentro de los listados de regulación comercial, como la CITES (Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres). Como muchos de los organismos traficados no sobreviven el traslado hasta su destino, a menudo en otro continente, para asegurar la entrega suele tener lugar una extracción desmedida

de reptiles, lo que pone en riesgo la continuidad de sus poblaciones.

El comercio ilegal representa una gran amenaza para los reptiles, sobre todo para especies con necesidades tan particulares que solo viven en regiones pequeñas del mundo. No solo sufren los saqueos de individuos, sino que al reducir sus poblaciones la variación genética decrece y se les deja una escasa probabilidad de sobrevivir a enfermedades u otros eventos catastróficos. Muchas de estas especies, y con ellas sus beneficios, pueden desaparecer pronto a menos que protejamos sus hábitats o creemos condiciones para aumentar sus poblaciones y su variación genética. La buena noticia es que aun en zonas muy afectadas por las prácticas humanas existen elementos de vegetación que pueden ayudar a la conservación de los reptiles, por ejemplo, la vegetación ribereña.

FUNCIONES Y AMENAZAS DE LA VEGETACIÓN RIBEREÑA

Los conjuntos de hierbas, arbustos y árboles que rodean los cuerpos de agua, como ríos y lagos, se denominan vegetación ribereña. La vegetación ribereña tiene funciones muy importantes; a partir de su follaje facilita la captación de agua y evita la erosión del suelo, ya que el agua de lluvia no impacta directamente en la tierra. Las raíces superficiales de este tipo de vegetación ayudan a contener elementos que contaminan el agua (fertilizantes o pesticidas), y las partes subterráneas favorecen la infiltración del agua. Además, la vegetación ribereña conecta los ambientes acuáticos y terrestres, lo que ofrece condiciones estables de humedad y temperatura; en consecuencia, representa un hábitat donde pueden desarrollarse diferentes especies. No obstante, la vegetación ribereña es una de las más amenazadas por el cambio de uso de suelo.

Por el cambio de uso de suelo, alrededor de las grandes urbes ha desaparecido 35 % de la vegetación ribereña a nivel mundial desde 1970, y en Latinoamérica se estima que se ha perdido aproximadamente 60 % de este tipo de vegetación (Darrah

et al., 2019). Este proceso no solo perjudica a poblaciones de animales y plantas, sino que también incrementa el riesgo de inundaciones y deslaves, así como la contaminación del agua (Álvarez Icaza, 2023). En este sentido, las personas también nos vemos perjudicadas por la remoción de vegetación ribereña. Cuando no hay árboles o arbustos que mantengan las corrientes de agua, los cultivos o incluso las viviendas aledañas son arrasadas cuando el cauce de los ríos crece drásticamente. Estas catástrofes generan cada año pérdidas de vidas humanas y daños al erario. Hay que entender que mantener la vegetación ribereña representa un beneficio tanto para animales silvestres como para las poblaciones humanas.

Los cauces de arroyos y ríos tienden a conectarse e integrarse para desembocar en un cuerpo de agua más grande. Colindando con la ruta que siguen los cuerpos de agua se encuentra la vegetación ribereña. Por este particular arreglo espacial, mantener la vegetación ribereña puede considerarse como una propuesta de conservación de diferentes organismos, entre ellos los reptiles. No solo porque la protección de este tipo de vegetación favorece la protección de animales y mantiene los beneficios a las poblaciones humanas, sino que al mantener la vegetación en cuencas se puede asegurar la continuidad de las poblaciones de reptiles y otros organismos silvestres, así como sus beneficios.

Al tener lugar el cambio de uso de suelo, algunos agricultores y ganaderos deciden mantener una delgada franja de vegetación ribereña para el descanso personal o para los animales de consumo (vacas, borregos, etc.). El “feliz accidente” de preservar estos remanentes ribereños no solo beneficia a los productores agrícolas, también puede ser la clave para lograr la supervivencia de poblaciones silvestres y la producción de alimentos para el ser humano. Para algunas especies animales, como los reptiles, les es difícil o hasta imposible recorrer campos de cultivo o pastizales para ganado (ni hablar de zonas urbanas).

Por las condiciones estables de temperatura y humedad, los remanentes ribereños pueden funcionar como rutas que permiten el tránsito e ingreso de



© Malú Méndez Lavielle. *Extrañada*.

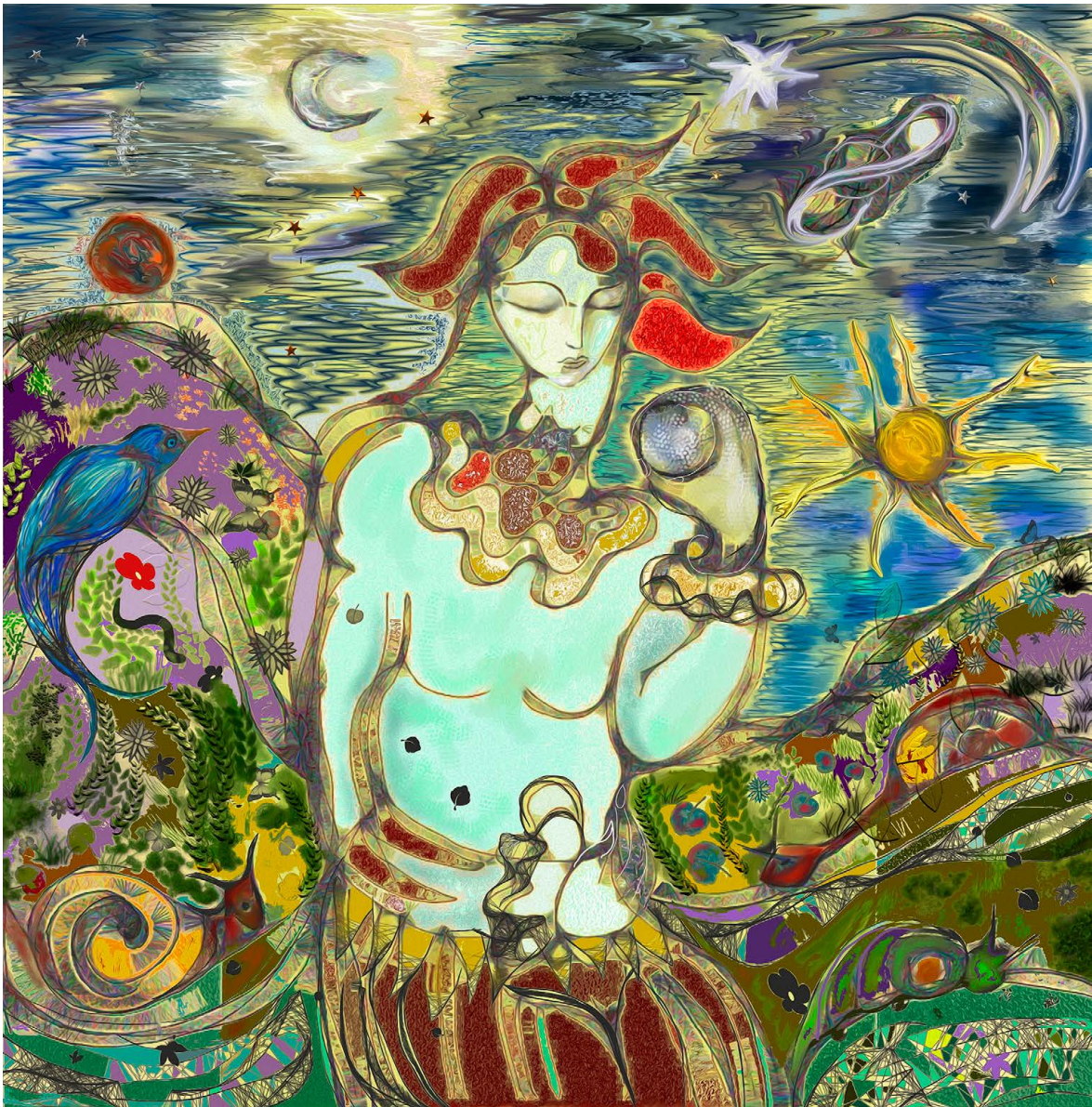
distintas especies, entre ellos los reptiles, a áreas naturales; es decir, son “corredores biológicos”. La función de la vegetación ribereña como corredor se evaluó en Rumania y los resultados son muy prometedores, ya que las áreas ribereñas pueden conectar distintas poblaciones de reptiles como lagartijas y serpientes (Sahlean *et al.*, 2020). Los beneficios de la vegetación ribereña pueden asegurar poblaciones por muchos años más.

Los espacios definidos como corredores biológicos permiten el paso de diferentes organismos, conectan poblaciones que podrían estar aisladas y promueven el intercambio de individuos entre poblaciones, lo que favorece su viabilidad no solo a nivel poblacional sino genético. Por ejemplo, en Sonora, las poblaciones de salamanguesa insular (*Phyllodactylus nocticolus*; una especie de gecko) son mucho más diversas genéticamente cuando se conserva la vegetación ribereña, lo que las hace más resistentes a eventos futuros como enfermedades (Blair *et al.* 2013). Con suerte, favorecen la presencia de distintas formas de genes (alelos) por la cruce entre individuos locales y recién llegados, por lo que, al mantener los remanentes de vegetación ribereña, mantenemos sus beneficios, el hábitat de diferentes

organismos (incluidos los reptiles) e, incluso, promovemos la variación genética entre poblaciones. Una medida con la que todos podemos ganar.

CONCLUSIÓN

Para enfrentar los desafíos que dificultan la conservación de los reptiles y seguir disfrutando de sus beneficios, es necesario revisar a detalle los listados de especies que pueden comercializarse, sin comprometer las poblaciones silvestres y, sobre todo, regular su tráfico. Es fundamental implementar acciones orientadas a proteger sus hábitats, asegurando la generación de poblaciones saludables, especialmente en los ecosistemas más vulnerables, como la vegetación ribereña. Y, por supuesto, investigar e informar a nuestros familiares y amigos sobre los beneficios de respetar las poblaciones de animales silvestres. Aunque mi abuelita falleció hace años, ahora mis padres y hermanos, mis tíos, mis primos y mis sobrinos han entendido que la mayoría de las lagartijas en México no son peligrosas, y que no hay que prejuzgar a los animales por su apariencia.



© Malú Méndez Lavielle. Arlequín y los planetas.

REFERENCIAS

Álvarez Icaza ED (2023). ¿Qué hay detrás de las inundaciones en aumento? *UNAM Global*. Recuperado de: https://unamglobal.unam.mx/global_revista/que-hay-detras-de-las-inundaciones-en-aumento/.

Blair C, Jimenez Arcos V, Mendez de la Cruz FR and Murphy RW (2013). Landscape genetics of leaf-toed geckos in the tropical dry forest of northern Mexico. *PLoS One* 8: e57433.

Darrah SE, Shennan-Farpón Y, Loh J *et al.* (2019). Improvements to the Wetland Extent Trends (WET) index as a tool for monitoring natural and human-made wetlands. *Ecological Indicators* 99:294-298.

Marshall BM, Strine C and Hughes AC (2020). Thousands of reptile

species threatened by under-regulated global trade. *Nature Communications* 11:1-12.

Oropeza-Sánchez MT, Suazo-Ortuño I y Benítez-Malvido J (2024). Los anfibios: platillos, remedios y su papel en los ecosistemas. *Revista Digital Universitaria* 25(1). DOI: <http://doi.org/10.22201/cuaieed.16076079e.2024.25.1.7>.

Sahlean TC, Papeş M, Strugariu A and Gherghel I (2020). Ecological corridors for the amphibians and reptiles in the Natura 2000 sites of Romania. *Scientific Reports* 10:19464.

Marco T. Oropeza-Sánchez
Roberto Munguía-Steyer
Facultad de Estudios Superiores, Iztacala
Universidad Nacional Autónoma de México
mtos0290@gmail.com

Nematodos entomopatógenos: biotecnología para el control sostenible de plagas en la agricultura

Gobinath Chandrakasan

Los nematodos entomopatógenos (NEP) son aliados naturales en el control biológico de plagas, gracias a su relación simbiótica con bacterias que eliminan insectos dañinos. A diferencia de los nematodos fitoparásitos (que atacan plantas), los NEP son beneficiosos para la agricultura y la horticultura, ya que destruyen plagas sin afectar a las plantas, a los seres humanos ni a otros animales.

El control sostenible de plagas agrícolas es esencial para garantizar la producción de alimentos y proteger el medio ambiente. En este contexto, los NEP destacan como una herramienta biotecnológica prometedora dentro del manejo agroecológico. Estos diminutos organismos del suelo infectan y eliminan insectos dañinos mediante una simbiosis con bacterias entomopatógenas, sin afectar la biodiversidad ni la salud humana. Además, su aplicación es sencilla y segura, lo que facilita su uso en distintos sistemas agrícolas. Los NEP representan así una alternativa ecológica y eficaz que impulsa una agricultura más limpia y sostenible.

En el panorama agrícola de México, los NEP representan una herramienta biotecnológica en pleno auge para el control sostenible de plagas. Estos organismos, aliados naturales de los cultivos, han mostrado una eficacia notable contra insectos de importancia económica como

Spodoptera frugiperda (gusano cogollero del maíz), *Diabrotica virgifera* (gusano de la raíz del maíz) y *Phyllophaga* spp. (gallina ciega), entre otros.

La adopción de estrategias biológicas reduce el uso de agroquímicos y fortalece la transición hacia modelos agrícolas sostenibles, en armonía con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y las políticas de mitigación del cambio climático. Este trabajo ofrece una revisión sobre la biología de los NEP, sus mecanismos de infección, su importancia ecológica, sus aplicaciones actuales y su relevancia como herramienta de interés para el diseño e implementación de políticas públicas en el sector agrícola (Pacheco Hernández *et al.*, 2019).

BIOLOGÍA DE LOS NEP

Los NEP son parásitos obligados de insectos y presentan un ciclo de vida complejo que abarca varias etapas de desarrollo: huevo, juvenil y adulto. La fase juvenil infecciosa (JI) constituye la única etapa de vida libre, encargada de localizar e infectar al hospedador. Estas JI utilizan quimiotaxis para detectar señales emitidas por los insectos y penetran en su organismo a través de aberturas naturales como la boca, los espiráculos o el ano, aunque también pueden atravesar directamente la cutícula. Una vez dentro del hospedador, los NEP liberan bacterias simbióticas alojadas en su intestino hacia el hemocele del insecto. El hemocele es la cavidad corporal principal de muchos invertebrados, llena de hemolinfa, un fluido similar a la sangre que baña y rodea los órganos internos directamente en lugar de circular a través de vasos sanguíneos.

Las especies del género *Steinernema* están asociadas con bacterias del género *Xenorhabdus*, mientras que las del género *Heterorhabditis* (Figura 1) se asocian con *Photorhabdus*. Estas bacterias se multiplican rápidamente, provocando septicemia y la muerte del hospedador en un lapso de 24 a 48 horas. Tras la muerte del insecto, los nematodos se alimentan de los tejidos en descomposición y completan varios ciclos reproductivos dentro del cadáver. Como resultado, se generan miles de nuevas juveniles infectivas que emergen del cuerpo del hospedador

muerto para reiniciar el ciclo en nuevos insectos. Los NEP se han adaptado a una amplia gama de condiciones ambientales y presentan distintos niveles de especificidad hacia sus hospedadores.

Algunas especies, como *S. carpocapsae*, adoptan una estrategia de depredación por emboscada, permaneciendo cerca de la superficie del suelo en espera de que pase un hospedador. Otras, como *H. bacteriophora*, actúan como cazadoras activas, desplazándose en el perfil del suelo en busca de presas (Grunseich *et al.*, 2021). Su supervivencia y eficacia están influenciadas por factores como la humedad del suelo, la temperatura y la disponibilidad de hospedadores.

MECANISMOS DE INFECCIÓN DE LOS NEP

El proceso de infección de los NEP es una secuencia precisa que inicia con la búsqueda del huésped y culmina con su muerte y la reproducción del nematodo.

Las JI, que viven en el suelo, buscan insectos guiadas por señales químicas como el dióxido de carbono o compuestos liberados por plantas dañadas. Una vez localizado el insecto, el nematodo penetra por aberturas naturales o perfora la cutícula con una estructura especializada. Dentro del cuerpo, evade el sistema inmunológico y libera bacterias simbióticas, que provocan una infección letal en 24 a 48 horas. Las bacterias transforman el interior del insecto en una fuente de alimento para los nematodos y producen antibióticos que evitan la competencia de otros microorganismos. Los nematodos se reproducen dentro del cadáver y, al agotarse los recursos, nuevas JI emergen al suelo para reiniciar el ciclo.

- **Búsqueda del hospedador y penetración.** Las JI localizan a sus hospedadores mediante la detección de señales ambientales como dióxido de carbono, vibraciones del suelo y compuestos químicos emitidos por los insectos. Las especies del género *Steinernema* suelen emplear una estrategia de emboscada, permaneciendo inmóviles cerca de la superficie del suelo a la espera de un hospedador que pase cerca. En cambio, las especies de *Heterorhabditis* adoptan una estrategia de búsqueda activa, desplazándose por el suelo hasta encontrar a su presa. Una vez localizado el hospedador, los nematodos penetran a

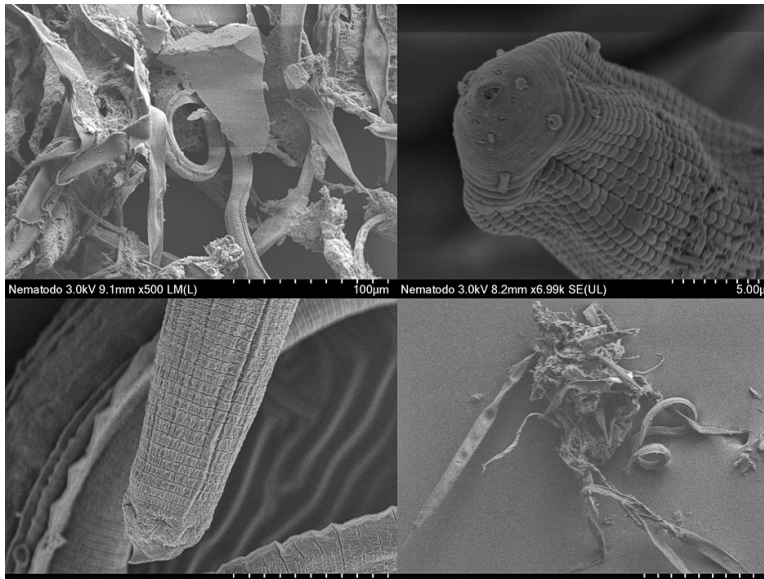


Figura 1. Imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) de *Heterorhabditis bacteriophora*. El nematodo fue obtenido mediante el procesamiento de muestras de suelo y la extracción de NEP utilizando *Galleria mellonella* como organismo trampa.

FUNCIÓN ECOLÓGICA DE LOS NEP

- **Control natural de plagas.** Los NEP desempeñan un papel clave en la regulación natural de poblaciones de insectos plaga, como larvas de escarabajos, gorgojos y orugas (Hokkanen y Menzler-Hokkanen, 2018).
- **Mejora de la salud del suelo.** La actividad de los NEP en el eco-

través de aberturas naturales (boca, espiráculos, ano) o perforan directamente la cutícula del insecto mediante la acción de enzimas hidrolíticas, que son proteínas que convierten moléculas complejas en otras más simples mediante hidrólisis, una reacción que utiliza agua para romper enlaces químicos. En los NEP, estas enzimas ayudan a debilitar y penetrar las capas externas del insecto huésped.

- **Liberación de bacterias simbióticas.** Estas bacterias se multiplican rápidamente y secretan diversos factores de virulencia, como toxinas, proteasas y lipasas, que suprimen la respuesta inmune del hospedador y degradan sus tejidos internos, facilitando la colonización.
- **Muerte del hospedador.** Como consecuencia de la septicemia provocada por las bacterias, el insecto muere en un lapso de 24 a 48 horas. Durante este periodo, los nematodos se alimentan de los tejidos en descomposición, mientras las bacterias continúan generando un ambiente favorable para el crecimiento y reproducción de los nematodos. El cadáver del hospedador se convierte en una fuente rica en nutrientes que permite la realización de múltiples ciclos reproductivos.
- **Emergencia y dispersión.** Una vez agotados los recursos dentro del hospedador, se desarrollan nuevas JI que emergen del cadáver y se dispersan en el suelo en busca de nuevos insectos. Este ciclo garantiza la propagación y permanencia de las poblaciones de NEP en ecosistemas naturales y agrícolas, contribuyendo al control biológico sostenible de plagas.

sistema edáfico favorece el reciclaje de nutrientes y estimula la diversidad microbiana (Thakur *et al.*, 2021). Al contribuir a la descomposición de los hospedadores muertos, enriquecen el suelo con materia orgánica, mejorando su fertilidad y promoviendo el crecimiento vegetal.

- **Conservación de la biodiversidad.** El uso de NEP como control biológico disminuye la dependencia de insecticidas químicos, protegiendo así a polinizadores, fauna silvestre y organismos acuáticos.
- **Estabilidad ecológica.** La incorporación de NEP ayuda a mantener la estabilidad de agroecosistemas y bosques, controlando insectos herbívoros y evitando daños graves a las plantas (Karuppiyah *et al.*, 2025).
- **Agricultura y silvicultura sostenibles.** El uso de NEP en el manejo integrado de plagas (MIP) ofrece una alternativa biológica eficiente a los agroquímicos, reduce el impacto ambiental y proporciona un control duradero de plagas, protegiendo cultivos y bosques y disminuyendo pérdidas económicas (Singh *et al.*, 2022).

FUNCIONES DE LOS NEP EN EL MANEJO INTEGRADO DE PLAGAS

- **Compatibilidad con otras estrategias del MIP.** Los NEP pueden emplearse en conjunto con otros agentes de control biológico, como microorganismos



© Malú Méndez Lavielle. *Edades*.

benéficos, hongos entomopatógenos o insectos depredadores, generando un efecto sinérgico que mejora la supresión de plagas. Esta integración fortalece la eficacia del MIP en diversos sistemas agrícolas.

- *Uso complementario con pesticidas químicos.* Algunas especies de NEP han demostrado ser compatibles con aplicaciones reducidas de insecticidas, lo que permite disminuir la cantidad de residuos químicos en los cultivos y minimizar los impactos negativos sobre el medio ambiente (Abd-Elgawad, 2023). Esta estrategia mixta es útil en programas de transición hacia una agricultura más sostenible.

- *Integración con prácticas culturales y controles mecánicos.* Los NEP pueden complementar técnicas como la rotación de cultivos, el uso de cultivos trampa, la incorporación de enmiendas orgánicas y el manejo físico del suelo, formando parte de un enfoque integral que maximiza la efectividad del control de plagas a largo plazo.

- *Alternativa ecológica y segura.* A diferencia de los insecticidas sintéticos, los NEP no representan riesgo para organismos no objetivo, como polinizadores, insectos benéficos, animales silvestres o seres humanos. Además, tras completar su ciclo de vida, se degradan de forma natural en el ambiente, generando un impacto ecológico mínimo. Seguros para las personas, los animales y el ambiente, los NEP son una alternativa ecológica a los pesticidas químicos y una herramienta clave del MIP. Pueden aplicarse mediante riego o pulverización convencional, y destacan por su capacidad para buscar plagas ocultas en el suelo. Sin embargo, su eficacia depende de las condiciones ambientales: requieren humedad, temperaturas moderadas y baja exposición solar. Además, tienen una vida útil corta y su producción y almacenamiento implican costos adicionales. Los NEP se utilizan con éxito en cultivos de alto valor (frutas, hortalizas y ornamentales) y en el control de plagas del suelo y forestales. Los avances en formulación y tecnología buscan mejorar su estabilidad y ampliar su uso.

- *Supresión prolongada de plagas.* Los NEP tienen la capacidad de establecer poblaciones persistentes en el suelo, ofreciendo un control continuo de insectos plaga. Su capacidad para reciclarse a través de hospedadores sucesivos les permite adaptarse a brotes de plagas, actuando de forma eficiente en el tiempo.
- *Flexibilidad de aplicación y facilidad de uso.* Los NEP pueden aplicarse mediante sistemas de riego, aspersiones foliares o tratamientos al suelo, lo que facilita su incorporación en diversos sistemas de producción agrícola. Son adecuados tanto para cultivos en campo abierto como en invernaderos, huertos y áreas de césped. Además, su eficacia se mantiene bajo distintas condiciones ambientales, especialmente en suelos con buena humedad.

RETOS Y PERSPECTIVAS

Pese a su efectividad comprobada, la adopción comercial de los NEP en México aún enfrenta importantes desafíos. Entre ellos destacan la optimización de técnicas de formulación y almacenamiento, para preservar la viabilidad y actividad infectiva de los nematodos durante su transporte y aplicación. Además, es fundamental fortalecer la capacitación de los productores en el manejo adecuado de estos agentes biológicos.

Investigaciones realizadas en instituciones demuestran que los NEP pueden reducir significativamente las poblaciones de plagas en campo, especialmente cuando se aplican bajo condiciones óptimas de humedad y temperatura. Estas experiencias exitosas demuestran su potencial como una alternativa ecológica frente al uso excesivo de plaguicidas químicos, contribuyendo así a la protección del ambiente y la salud humana.

La biotecnología moderna abre nuevas rutas para superar estas limitantes: desde la creación de bioformulados más estables, en presentaciones tipo polvo o gel, hasta la identificación y selección de cepas nativas con mayor tolerancia a la desecación y adaptadas a los suelos mexicanos. Estas innovaciones marcan el camino hacia un biocontrol más eficiente, accesible y ambientalmente responsable, consolidando el papel de los NEP como actores clave en la agricultura del futuro.



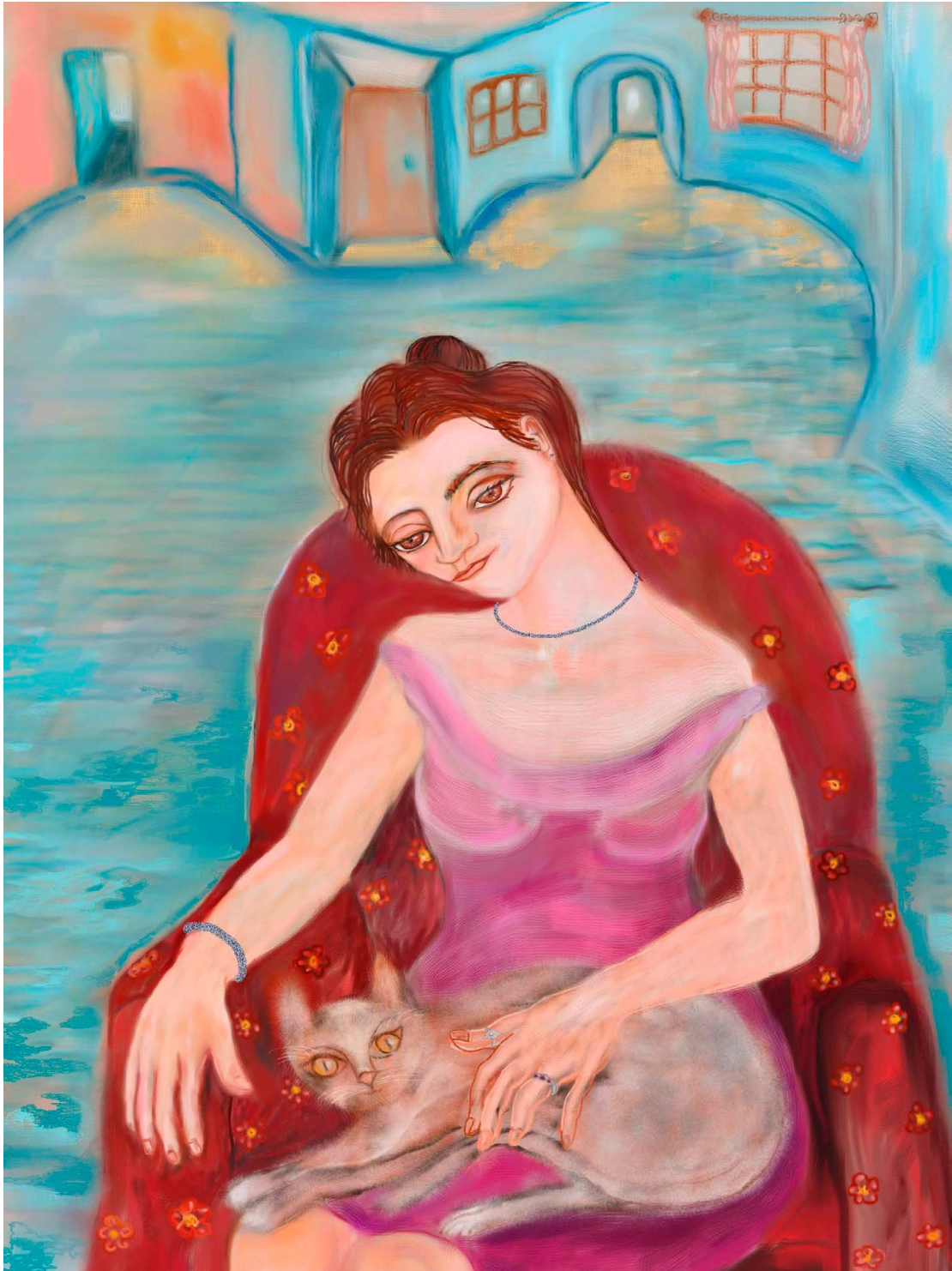
© Malú Méndez Lavielle. *Damas inglesas.*

REFERENCIAS

- Abd-Elgawad MM (2023). Optimizing entomopathogenic nematode genetics and applications for the integrated management of horticultural pests. *Horticultrae* 9(8):865.
- Grunseich JM, Aguirre NM, Thompson MN *et al.* (2021). Chemical Cues from Entomopathogenic Nematodes Vary Across Three Species with Different Foraging Strategies, Triggering Different Behavioral Responses in Prey and Competitors. *J Chem Ecol* 47 (10-11):822-833. DOI: 10.1007/s10886-021-01304-8.
- Hokkanen HM and Menzler-Hokkanen I (2018). Insect pest suppressive soils: buffering pulse cropping systems against outbreaks of *Sitona* weevils. *Ann Entomol Soc Am* 111 (4):139-143.
- Karuppiah P, Thayalan KJ, Thangam GS *et al.* (2025). Bio-Control Agents: A Sustainable Approach for Enhancing Soil Nutrients Use Efficiency in Farming. In *Bio-control Agents for Sustainable Agriculture: Diversity, Mechanisms and Applications* (pp. 209-260). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Pacheco HM, Reséndiz Martínez J and Arriola Padilla VJ. (2019). Organismos entomopatógenos como control biológico en los sectores agropecuario y forestal de México: una revisión. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 10(56):4-32.
- Singh AK, Kumar M, Ahuja A *et al.* (2022). Entomopathogenic nematodes: a sustainable option for insect pest management. In *Biopesticides* (pp. 73-92). Woodhead Publishing, Sawston, UK.
- Thakur N, Tomar P, Kaur S *et al.* (2021). Entomopathogenic soil microbes for sustainable crop protection. In *Soil Microbiomes for Sustainable Agriculture: Functional Annotation* (pp. 529-571). Cham: Springer International Publishing, Switzerland.

Gobinath Chandrakasan
Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Querétaro
gobi.marine@gmail.com

© Malú Méndez Lavielle. *Reposo.*



Cambio global y resiliencia ecológica de las redes de interacción bióticas

Jorge E. **Ramírez-Albores**
Alina Gabriela **Monroy-Gamboa**

El cambio global abarca un conjunto amplio de transformaciones ambientales: el cambio climático, la pérdida de biodiversidad, la deforestación, la contaminación y la modificación de ciclos biogeoquímicos, que constituyen las mayores amenazas para la biodiversidad. Estas transformaciones alteran profundamente las redes de interacción biótica que sustentan los ecosistemas y afectan a la biosfera de manera integral. Estas redes representan los vínculos entre especies (por ejemplo, depredación, polinización, competencia), cuya complejidad y estabilidad regulan la dinámica, diversidad y persistencia de las comunidades ecológicas, siendo particularmente vulnerables a las alteraciones climáticas que afectan el equilibrio y la funcionalidad de los sistemas naturales (Sobral y Magrach, 2019). Aunado a la alteración de los patrones climáticos, factores como la introducción de especies exóticas y la fragmentación del hábitat están reconfigurando las conexiones entre especies (Doherty *et al.*, 2023), reduciendo la resiliencia –entendida como la capacidad de un ecosistema para absorber perturbaciones y mantener su estructura y funciones esenciales– y debilitando su capacidad de recuperación.

Frente a este panorama, resulta indispensable replantear la relación entre la sociedad humana y los ecosistemas de los que depende. La mitigación del cambio global

no solo implica reducir emisiones o conservar áreas naturales, sino también restaurar la conectividad entre hábitats, fomentar prácticas productivas sostenibles y fortalecer políticas ambientales basadas en evidencia científica. Solo a través de una acción colectiva, informada y sostenida será posible preservar la integridad ecológica del planeta y asegurar los servicios ecosistémicos que sustentan la vida y el bienestar humano.

¿CUÁLES SON LAS INTERACCIONES BIÓTICAS?

En los ecosistemas, las interacciones bióticas regulan las relaciones entre las especies que coexisten en un mismo hábitat, determinando su abundancia, distribución y papel ecológico (Búrquez, 2022). Estas interacciones adoptan múltiples formas, desde asociaciones beneficiosas hasta relaciones de competencia o depredación, y resultan esenciales para el equilibrio y funcionamiento de las comunidades naturales. Entre ellas destaca la simbiosis, entendida como una asociación estrecha y prolongada entre organismos de distintas especies, en la que al menos uno obtiene un beneficio. En muchos casos, ambas partes se ven favorecidas, estableciendo vínculos funcionales que pueden ser indispensables para la supervivencia de una o ambas especies (Bronstein, 2015).

Dentro de las relaciones simbióticas se encuentran el mutualismo, el comensalismo, la depredación y la competencia. El mutualismo es fundamental para la estructura y estabilidad de los ecosistemas, pues interviene en procesos ecológicos clave como la polinización, la dispersión de semillas y la defensa ante patógenos o depredadores (Bronstein, 2015). Estos vínculos generan redes de interacción que sostienen la productividad y la resiliencia ecológica. En el comensalismo, una especie obtiene beneficios –como refugio, alimento o transporte– sin perjudicar a la otra. Entre sus variantes se incluyen el inquilinismo, ejemplificado por el tecolote llanero (*Athene cunicularia*), que utiliza madrigueras abandonadas por perritos de las praderas (*Cynomys* spp.); la foresia,

en la que organismos como las rémoras se adhieren a tiburones para desplazarse y protegerse; y la tanatocresia, donde los cangrejos ermitaños emplean conchas vacías de moluscos como refugio.

La depredación cumple una función reguladora al controlar las poblaciones de presas y mantener el equilibrio ecológico (Sobral y Magrach, 2019; Búrquez, 2022; del Val, 2022). Un ejemplo paradigmático es el del lobo gris (*Canis lupus*) en el Parque Nacional Yellowstone (EE. UU.), cuya reintroducción restableció la dinámica entre alces (*Alces alces*) y álamos (*Populus tremuloides*), revirtiendo la degradación vegetal causada por la ausencia del depredador. Además, los depredadores limitan la proliferación de insectos nocivos, reduciendo plagas agrícolas y la transmisión de enfermedades zoonóticas. Dentro de este grupo se incluyen el parasitismo y la herbivoría. En el parasitismo, una especie se beneficia a costa de otra, como ocurre con garrapatas, pulgas o helmintos que se alimentan o reproducen en sus hospederos. A diferencia de los depredadores, los parásitos mantienen una relación más duradera, dependiendo parcial o totalmente del hospedero para completar su ciclo vital.

La herbivoría constituye otro proceso esencial, en el que los herbívoros consumen tejidos vegetales vivos total o parcialmente. Aunque este consumo no siempre provoca la muerte de la planta, puede afectar su crecimiento, reproducción y supervivencia. Este tipo de interacción incide en la estructura de la vegetación, regula la competencia entre especies y promueve el reciclaje de nutrientes, desempeñando un papel clave en la dinámica trófica y en el mantenimiento de la productividad ecosistémica.

Finalmente, la competencia se manifiesta cuando dos o más especies utilizan los mismos recursos limitados –como alimento, espacio o luz–, reduciendo su crecimiento, supervivencia o éxito reproductivo (Sobral y Magrach, 2019; Búrquez, 2022; del Val, 2022). Esta competencia interespecífica influye en la dinámica poblacional, la distribución geográfica y la estructura de las comunidades. Con el tiempo, puede conducir a la exclusión competitiva, donde una especie desplaza a otra, o a la partición del nicho, que permite la especialización y coexistencia.



© Malú Méndez Lavielle. *Lectora de historias*.

En ecosistemas perturbados, la competencia suele intensificarse, especialmente cuando las condiciones ambientales superan los límites de tolerancia de las especies, ocasionando declives o extinciones locales. Un caso ilustrativo es la expansión del pez diablo (*Pterygoplichthys* spp.) en los ríos del sureste de México, cuya invasión desplaza a peces nativos y altera las redes tróficas locales, evidenciando cómo las interacciones bióticas determinan la estabilidad y resiliencia de los ecosistemas.

IMPORTANCIA A NIVEL DE ECOSISTEMA

En conjunto, estas interacciones conforman redes ecológicas complejas que modulan la estabilidad y resiliencia de los ecosistemas. Además, constituyen un componente central en la organización de las comunidades, ya que moldean los patrones de biodiversidad y actúan como motores de los procesos evolutivos, influyendo en mecanismos como la selección

natural, la divergencia adaptativa y la coevolución. Sin embargo, diversos factores pueden alterarlas o modificarlas, generando cambios en la distribución, abundancia y fenología de las especies, lo que compromete la estabilidad poblacional y el equilibrio de los ecosistemas (HilleRisLambers *et al.*, 2013; Faillace *et al.*, 2021).

Entre los principales agentes de perturbación destacan el cambio climático, la fragmentación del hábitat, las invasiones biológicas y la contaminación, todos ellos capaces de transformar las redes tróficas y mutualistas, desestabilizando procesos ecológicos esenciales. Estas alteraciones reducen la resiliencia de los ecosistemas, promueven la pérdida de biodiversidad y modifican los patrones de coevolución, afectando el funcionamiento y los servicios ecosistémicos a múltiples escalas. De todos estos factores, el cambio climático sobresale por su

rapidez y magnitud, así como por sus efectos sinérgicos con la deforestación y la cacería furtiva. Este fenómeno provoca desajustes en la sincronización entre especies al alterar su distribución geográfica y modificar los ciclos biológicos, lo que repercute en su abundancia y dinámica poblacional (Gellesch et al., 2013; Faillace et al., 2021).

La resiliencia ecológica se define como la capacidad de un ecosistema para absorber perturbaciones –naturales o antrópicas– y mantener su estructura, composición y funciones esenciales. Sus principales mecanismos incluyen la diversidad funcional, que mantiene procesos esenciales al distribuir funciones entre especies; la redundancia ecológica, que permite la sustitución funcional cuando se pierden componentes del sistema; y la conectividad del paisaje, que facilita el flujo de organismos y genes, favoreciendo la recolonización y la estabilidad. Para medir esta capacidad se emplean métricas como la resistencia (grado de respuesta ante un disturbio), la recuperación (velocidad con que retorna al estado previo) y la persistencia (duración de sus funciones en el tiempo). La integración de estos indicadores en modelos ecológicos y estrategias de manejo adaptativo permite identificar umbrales de vulnerabilidad y fortalecer la estabilidad de los ecosistemas, asegurando su funcionamiento y los servicios que sostienen la vida frente a los efectos del cambio global.

En el contexto del cambio global, la resiliencia se ve comprometida por la simultaneidad y la intensidad de las presiones que afectan los sistemas naturales. A diferencia de los disturbios locales o temporales, el cambio global opera de manera acumulativa y a escalas espaciales y temporales sin precedentes. Las alteraciones en el clima, los usos de suelo y los flujos biogeoquímicos generan un efecto sinérgico que supera la capacidad adaptativa de muchas especies y comunidades. Fortalecer la resiliencia implica conservar la diversidad funcional, restaurar la conectividad ecológica y reducir las causas estructurales del deterioro ambiental. Solo mediante estos enfoques integrados es posible sostener la estabilidad ecológica



© Malú Méndez Lavielle. *El ruso*.

y mantener los servicios que permiten el bienestar humano y la continuidad de la vida en el planeta.

En los sistemas planta-polinizador, el incremento de la temperatura puede producir cambios fenológicos, como la floración prematura de algunas especies vegetales sin que exista una respuesta sincronizada en sus polinizadores, lo que reduce la tasa de polinización y limita el éxito reproductivo de las plantas, comprometiendo la persistencia de ambas poblaciones. Un ejemplo claro de estos desajustes se observa en México, donde el incremento de las temperaturas y la pérdida de cobertura vegetal han alterado la sincronía entre los murciélagos nectarívoros (como *Leptonycteris yerbabuena*) y los agaves (*Agave* spp.), interrumpiendo procesos de polinización clave para la supervivencia de ambos organismos y generando repercusiones económicas al reducir la productividad de cultivos asociados a la elaboración de mezcal y tequila. De manera análoga, en ecosistemas árticos el deshielo prematuro ha provocado desajustes fenológicos entre la disponibilidad de forraje y las demandas energéticas de herbívoros, cuya reproducción ya no coincide con los picos de oferta alimenticia, comprometiendo su éxito poblacional. Esto repercute negativamente en su supervivencia y genera efectos en cascada hacia niveles tróficos superiores, comprometiendo la estabilidad de las cadenas alimenticias y debilitando la funcionalidad del ecosistema.



© Malú Méndez Lavielle. Reunión felina.

La velocidad del cambio ambiental inducido por actividades humanas –como la fragmentación del hábitat derivada de la intensificación agrícola y ganadera, la contaminación o la introducción de especies exóticas– supera la capacidad adaptativa de muchas especies. Estos cambios ocurren en escalas de tiempo reducidas (décadas o años), mientras que los mecanismos de respuesta evolutiva o adaptativa requieren periodos más prolongados. Esta desincronización genera una pérdida de funcionalidad ecológica, disminuyendo la resiliencia de las comunidades y, en casos extremos, provocando extinciones locales o globales. Este desajuste constituye uno de los principales impulsores de la actual crisis de biodiversidad. Asimismo, la fragmentación del hábitat interrumpe las redes de interacciones bióticas al dividir los ecosistemas en parches aislados, reduciendo la conectividad ecológica y limitando funciones esenciales. Por ejemplo, polinizadores como abejas y murciélagos encuentran barreras físicas que restringen su acceso a las plantas, disminuyendo la fecundidad y el éxito reproductivo de estas. De manera similar, los dispersores de semillas –como ciertos primates– ven comprometida su movilidad y funcionalidad debido a la reducción y el aislamiento de los fragmentos de vegetación.

Los grandes depredadores, altamente sensibles a estas alteraciones, suelen experimentar declives

poblacionales que desencadenan efectos en cascada, reconfigurando las redes tróficas y afectando la estabilidad de las comunidades. Estos ejemplos ilustran cómo el cambio global no solo altera la distribución y abundancia de las especies, sino que también transforma la estructura y el funcionamiento de las interacciones ecológicas, comprometiendo la integridad y resiliencia de los ecosistemas.

ACCIONES PARA EVITAR O DISMINUIR LA ALTERACIÓN EN LAS INTERACCIONES

La conservación de los ecosistemas requiere un enfoque integral que no solo proteja a las especies, sino también las interacciones ecológicas que sustentan su funcionalidad y estabilidad frente al cambio climático (del Val, 2022). Un ejemplo claro es la restauración de polinizadores nativos, como las abejas sin aguijón (*Melipona beecheii*) en la península de Yucatán, cuya preservación garantiza la regeneración de plantas silvestres y cultivos agrícolas. De manera complementaria, los corredores biológicos en la Sierra Madre Oriental facilitan la conectividad de mamíferos medianos y grandes, promoviendo la dispersión de semillas y el control natural de herbívoros. En ambientes acuáticos, la protección de mutualismos entre peces limpiadores y especies hospedadoras de arrecifes, como los gobios y sus anfitriones de mayor tamaño, contribuye a mantener la estructura trófica y la salud de los arrecifes de coral. Finalmente, la implementación de prácticas agroecológicas, como setos vivos y la diversificación de cultivos, conserva interacciones tróficas esenciales entre insectos, aves y plantas, fortaleciendo la resiliencia ecológica de los paisajes productivos. Estos ejemplos ilustran que preservar las interacciones ecológicas es tan crucial como conservar las especies, ya que constituyen la base del equilibrio y la capacidad de adaptación de los ecosistemas frente a las perturbaciones ambientales. Para alcanzar este objetivo, es necesario implementar estrategias que restauren los procesos ecológicos y fortalezcan la resiliencia ambiental. Entre las acciones clave se incluyen:

1. *Reintroducción y protección de depredadores tope*. La reintroducción de especies depredadoras en zonas donde han sido localmente extirpadas puede generar efectos tróficos en cascada que promuevan la recuperación de funciones ecológicas y el restablecimiento del equilibrio ecosistémico. En México, la reintroducción del lobo mexicano (*Canis lupus baileyi*) ha favorecido el control de herbívoros y mesodepredadores, contribuyendo a la recuperación de hábitats degradados. De manera similar, en Argentina, la reintroducción del jaguar (*Panthera onca*) en los Esteros del Iberá ha demostrado su capacidad para regular poblaciones de presas clave y fortalecer la resiliencia ecológica del sistema. Estas iniciativas deben complementarse con acciones de protección que minimicen el riesgo de nuevas extinciones locales y fomenten la participación activa de las comunidades humanas, cuyo involucramiento es esencial para garantizar el éxito y la sostenibilidad de los programas de conservación.

2. *Restauración de hábitats*. La conexión de fragmentos de vegetación a través de corredores ecológicos favorece el desplazamiento de especies, la dispersión de semillas y el mantenimiento de interacciones ecológicas clave. Idealmente, estos corredores deben estar conformados por vegetación secundaria nativa que provea hábitat y recursos adecuados. En entornos altamente transformados, como paisajes urbanos, la integración de parques, camellones y jardines con plantas nativas puede funcionar como conectores funcionales. En México, los corredores biológicos de la Sierra Madre Oriental y el Corredor Biológico Mesoamericano son ejemplos exitosos de cómo la conectividad ecológica puede sostener redes funcionales entre fragmentos de bosque.

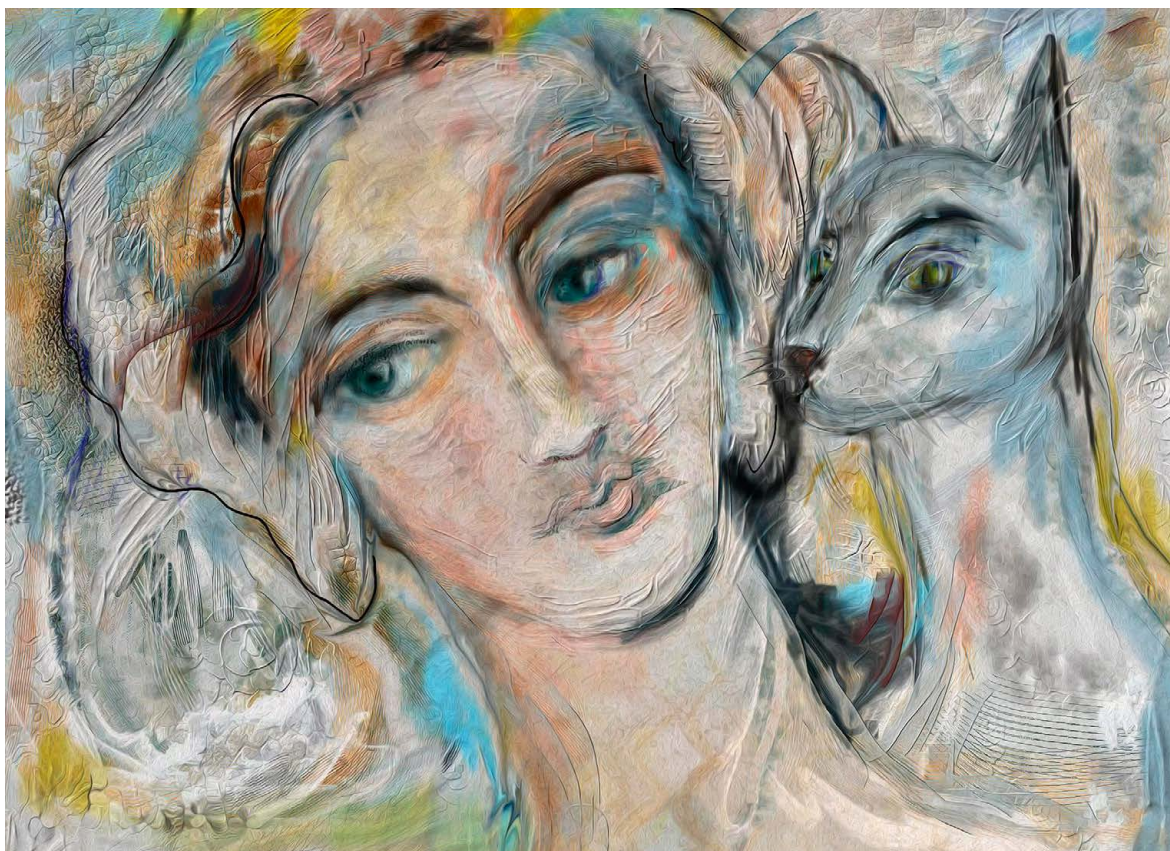
3. *Control de especies invasoras*. Su eliminación o manejo es fundamental para restablecer interacciones tróficas naturales y recuperar funciones ecológicas esenciales. En las islas del Golfo de California, la eliminación de cabras ferales permitió la regeneración de comunidades vegetales endémicas, restableciendo las redes entre plantas y dispersores. En las Islas Galápagos, el control de ratas y cabras

ha posibilitado la recuperación de tortugas gigantes (*Chelonoidis spp.*) y aves marinas, restableciendo nodos críticos dentro de la red trófica insular.

4. *Manejo sustentable de recursos*. Las redes de interacción biótica poseen cierto grado de autorregulación cuando los recursos son gestionados de manera sostenible. La pesca con cuotas adaptativas en comunidades costeras de Baja California Sur ha permitido conservar poblaciones viables y preservar las relaciones tróficas en ecosistemas marinos. Tecnologías de monitoreo, como el rastreo satelital del jaguar (*Panthera onca*) en la Selva Maya o las cámaras trampa en la Sierra Madre Occidental, han facilitado el análisis de redes de movimiento y comportamiento, mejorando las estrategias de conservación. Asimismo, proyectos de restauración basados en la ecología del comportamiento, como la reintroducción de la guacamaya roja (*Ara macao*) en Veracruz y Costa Rica, han demostrado que fortalecer vínculos sociales y ecológicos aumenta la estabilidad de las redes mutualistas y la resiliencia del ecosistema.

Las redes de interacciones bióticas son la estructura invisible que sostiene la biodiversidad y los servicios ecosistémicos. Sin embargo, el cambio global –a través del cambio climático, la deforestación, la fragmentación del hábitat y la introducción de especies invasoras– está reconfigurando estas redes, alterando relaciones críticas como el mutualismo planta-polinizador o las dinámicas depredador-presa. La comprensión de cómo se reorganizan estos entramados bajo escenarios de perturbación es esencial para desarrollar estrategias de manejo adaptativo y restauración funcional. Por lo tanto, comprender cómo se reconfiguran las redes bióticas bajo escenarios de perturbación resulta crucial para diseñar estrategias de mitigación oportunas y adaptaciones basadas en principios ecológicos.

La aplicación conjunta de estas acciones, junto con políticas de conservación integrales, el fortalecimiento de la conectividad ecológica y la gestión activa de especies clave e invasoras, permite incrementar la resiliencia y sostenibilidad de los ecosistemas ante la creciente presión ambiental. En definitiva, solo mediante esfuerzos interdisciplinarios, coordinados y sostenidos será posible preservar la complejidad



© Malú Méndez Lavielle. Proceso.

de las interacciones bióticas y, con ello, garantizar la estabilidad y funcionalidad de los ecosistemas en un mundo cada vez más transformado por la actividad humana.

AGRADECIMIENTOS

A los Fondos Institucionales de Investigación para los proyectos 38111-425104001-2389y38111-425104001-2178 de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. A Erika J. Cruz-Bazán y a Eber G. Chávez-Lugo por su apoyo en la recopilación de información.

REFERENCIAS

- Bronstein JL (2015). The study of mutualism. En Bronstein JL (Ed.), *Mutualism* (pp. 3-19). Oxford University Press.
- Búrquez A (2022). Interacciones bióticas. *Boletín de la SCME* 2:14-21.
- del Val E (2022). Redes de interacciones para el estudio de la biodiversidad. *Revista Digital Universitaria* 23.
- Doherty S, Saltré F, Llewelyn J *et al.* (2023). Estimating co-extinction threats in terrestrial ecosystems. *Global Change Biology* 29:5122-5138.

Faillace CA, Sentis A and Montoya JM (2021). Eco-evolutionary consequences of habitat warming and fragmentation in communities. *Biological Reviews* 96:1933-1950.

Gellesch E, Hein R, Jaeschke A *et al.* (2013). Biotic interactions in the face of climate change. En Lüttge U, Begg W, Francis D, Cushman J (Eds.), *Progress in Botany* 74 (pp. 321-349), Springer-Verlag, Berlin.

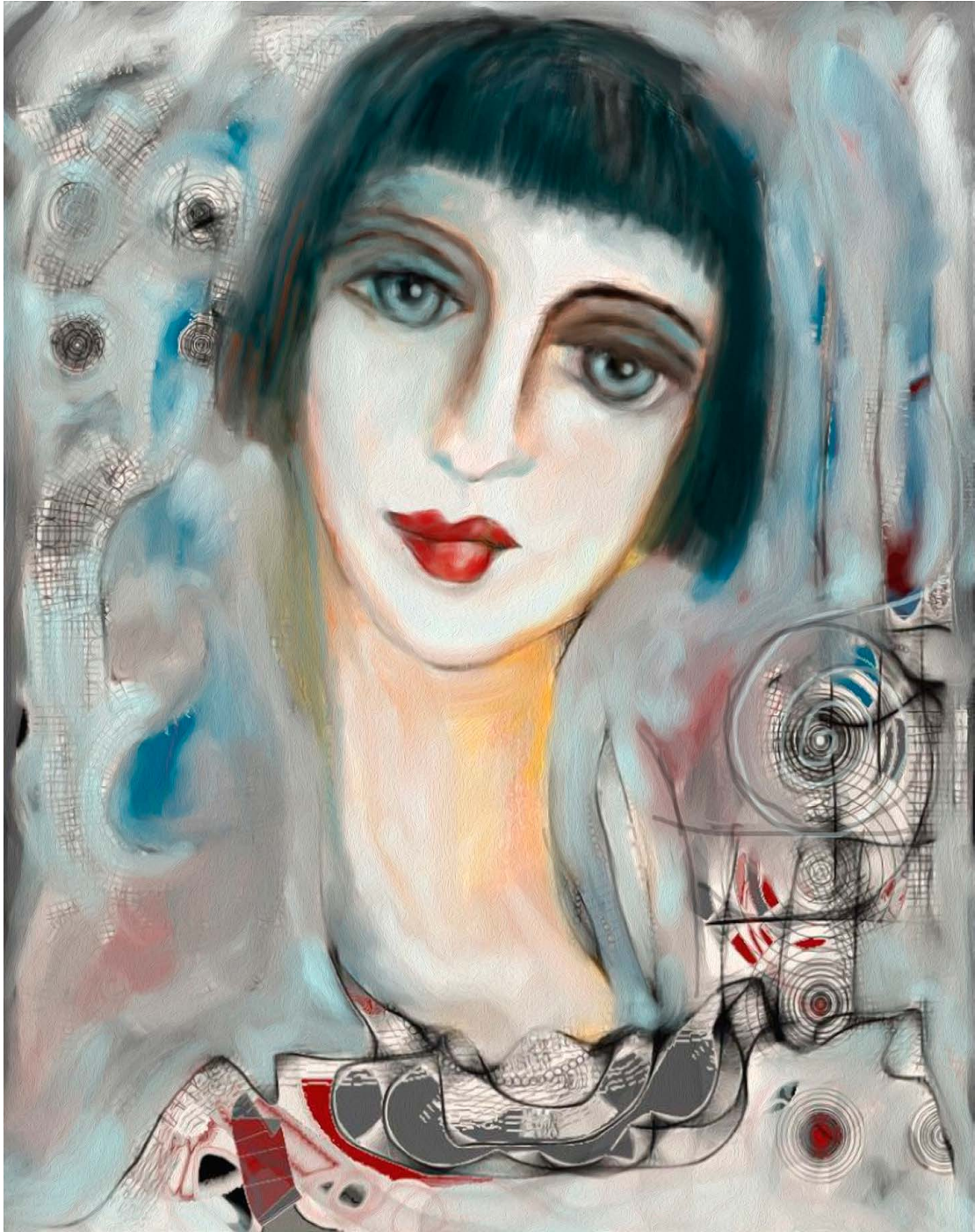
HilleRisLambers J, Harsch MA, Ettinger AK *et al.* (2013). How will biotic interactions influence climate change-induced range shifts? *Annals of the New York Academy Science* 1297:112-125.

Sobral M, Magrach A (2019). Restaurando la funcionalidad de los ecosistemas: la importancia de las interacciones entre especies. *Ecosistemas* 28:4-10.

Jorge E. Ramírez-Albores
Departamento de Botánica
Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro
Saltillo, Coahuila
jorgeramirez22@hotmail.com

Alina Gabriela Monroy-Gamboa
Programa de Planeación Ambiental y Conservación
Centro de Investigaciones Biológicas del
Noroeste S. C. La Paz, Baja California Sur

© Malú Méndez Lavielle. *Espiral*.



La fresa y su lenguaje químico

Neby M. **Mérida-Torres**
Samuel **Cruz-Esteban**

La fresa (*Fragaria spp.*, Rosaceae) es uno de los frutos más apreciados en todo el mundo, no solo por su sabor y aroma característicos, sino también por su relevancia económica en países productores como México. Sin embargo, su cultivo enfrenta serias amenazas derivadas de plagas que afectan tanto el rendimiento como la calidad del fruto. Entre las más importantes destacan la araña roja de dos manchas (*Tetranychus urticae* Koch, Acari: Tetranychidae) y el trips occidental de las flores (*Frankliniella occidentalis* Pergande, Thysanoptera: Thripidae) (Figura 1), cuya presencia puede ocasionar pérdidas significativas para los agricultores.

Lejos de atacar al azar, estas plagas utilizan un sofisticado sistema de localización basado en la detección de compuestos orgánicos volátiles (COVs), pequeñas moléculas orgánicas que las plantas liberan para interactuar con su entorno (Figura 1) (Dudareva *et al.*, 2006). Estos infoquímicos cumplen funciones esenciales en la ecología de las plantas: pueden atraer polinizadores que aseguren la reproducción, repeler herbívoros indeseados o incluso convocar a los enemigos naturales de las plagas. Sin embargo, este mismo lenguaje químico puede convertirse en una vulnerabilidad, pues ciertos herbívoros lo aprovechan para localizar más fácilmente a sus hospederos (Bruce y Pickett, 2011).

En el caso particular de la fresa, investigaciones recientes han demostrado que los perfiles de compuestos volátiles emitidos por la planta cambian de acuerdo con su estado

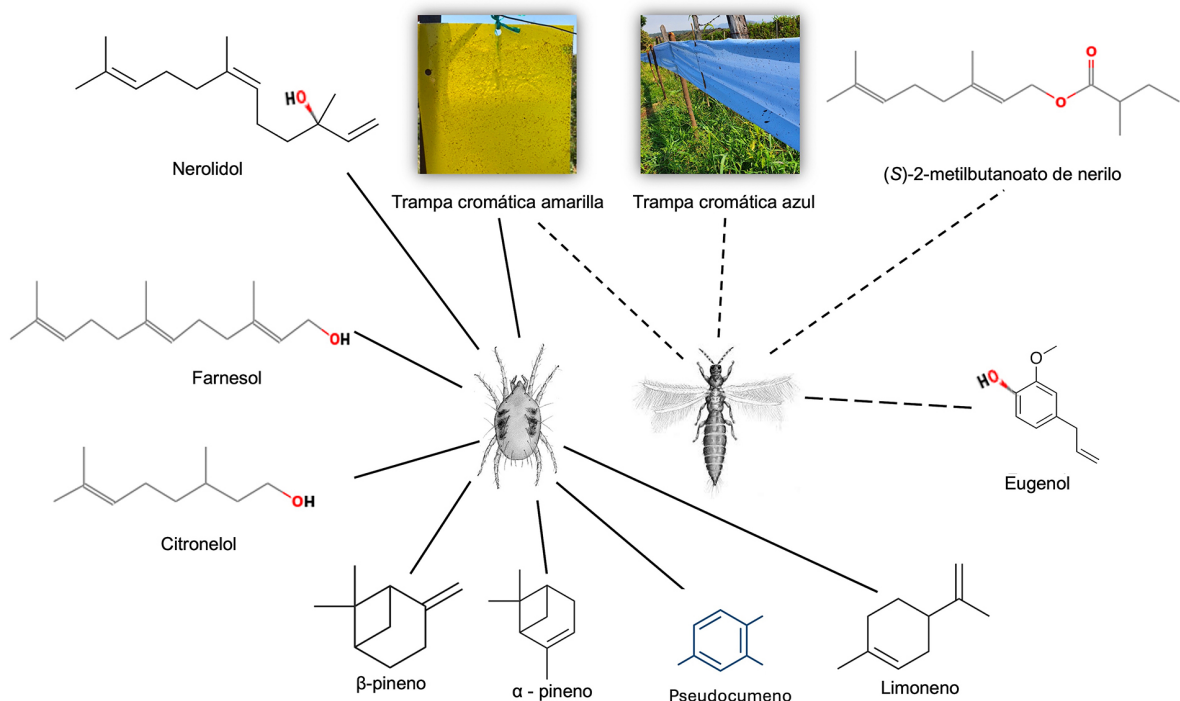


Figura 1. Interacción entre *Tetranychus urticae* con el color amarillo y algunos compuestos volátiles de plantas de fresa y conespecíficos, así como la interacción de *Frankliniella occidentalis* con los colores azul y amarillo, y con compuestos volátiles (Edición: Neby M. Mérida-Torres).

fisiológico, es decir, si se encuentra sana o dañada. Esta variación en las emisiones influye en el comportamiento de plagas como *T. urticae* y *F. occidentalis*, que ajustan sus preferencias en función de dichas señales químicas (Zhang *et al.*, 2022; Mérida-Torres *et al.*, 2023). Además, se ha confirmado que la composición de COVs emitidos por las plantas de fresa no solo depende de su estado fenológico (brotación, floración o fructificación), sino también de las condiciones agroecológicas locales, lo que añade un nivel extra de complejidad a la interacción. Este conocimiento ha permitido identificar una posible secuencia de ataque de ambas plagas. Los cultivos pueden ser invadidos de manera independiente por cualquiera de ellas, pero cuando coinciden, se ha observado que *T. urticae* tiende a colonizar primero, generando daños iniciales que posteriormente favorecen la atracción de *F. occidentalis*. Este último es igualmente atraído por plantas sanas y por aquellas previamente infestadas por la araña roja, lo que crea un escenario de infestación más rápido y difícil de manejar (Mérida-Torres *et al.*, 2024).

Estos hallazgos amplían nuestra comprensión de la ecología química en la fresa y abren nuevas oportunidades para el diseño de estrategias de manejo basadas en contextos regionales, como el desarrollo de trampas cromáticas y selectivas (atrayentes) que imiten compuestos volátiles específicos, reduciendo así la dependencia de insecticidas de amplio espectro y promoviendo un control más sostenible de las plagas (Mérida-Torres *et al.*, 2023 y 2024).

EL LENGUAJE INVISIBLE:

COMPUESTOS VOLÁTILES DE LA FRESA

Las plantas cuentan con un sofisticado sistema de comunicación química basado en la liberación de COVs. Estas moléculas son emitidas por hojas, flores y frutos, y su producción se intensifica en condiciones de estrés como sequías, heridas mecánicas o ataques de herbívoros (Dudareva *et al.*, 2006). En el caso de la fresa, este lenguaje químico cumple múltiples funciones: atraer polinizadores, repeler insectos herbívoros y, en algunos casos, convocar a depredadores o parasitoides naturales de las plagas (Bruce y Pickett, 2011). Este sistema de defensa, sin

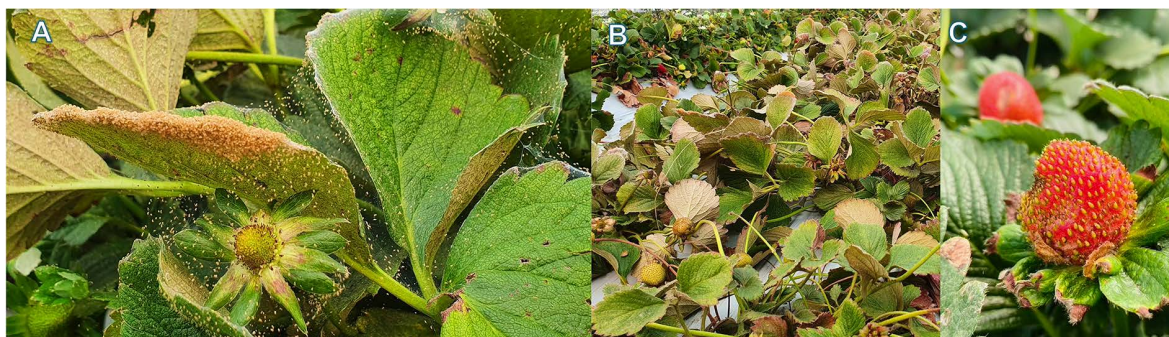


Figura 2. A) Cultivo de fresa con alta incidencia de *Tetranychus urticae* y *Frankliniella occidentalis*, B) Cultivo después de ser atacado por *Tetranychus urticae* y C) Frutos de fresa deformes, posiblemente por daños de *Frankliniella occidentalis* (Fotografías: Samuel Cruz-Esteban).

embargo, también puede convertirse en un arma de doble filo. Plagas como la araña roja (*T. urticae*) y el trips (*F. occidentalis*) han desarrollado la capacidad de interpretar estas señales químicas para identificar y localizar a sus plantas hospedantes, aumentando la probabilidad de infestación (Figura 1) (Zhang *et al.*, 2022; Mérida-Torres *et al.*, 2024). Comprender cómo estas plagas se “aprovechan” del lenguaje de las plantas revela la complejidad de las interacciones ecológicas y abre la puerta al diseño de estrategias de manejo más inteligentes y sostenibles, basadas en manipular o imitar estos compuestos volátiles.

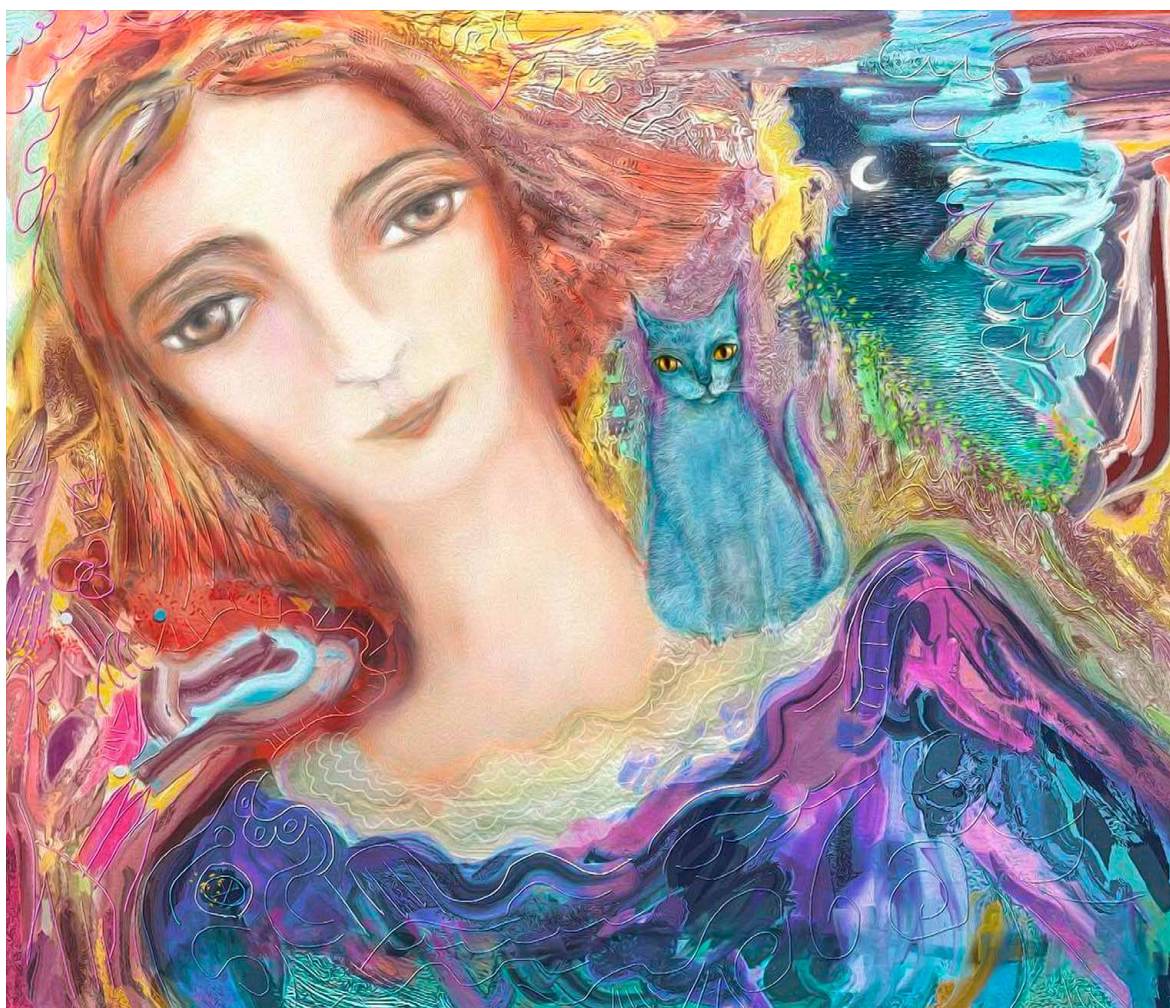
LA ARAÑA ROJA DE DOS MANCHAS (TETRANYCHUS URTICAE)

La araña roja es un ácaro diminuto que se alimenta de las células de las hojas de fresa, causando manchas cloróticas, debilitamiento general de la planta y, en infestaciones severas, incluso su muerte (Figura 2B). Investigaciones recientes revelan que *T. urticae* no solo es atraída por plantas sanas, sino que muestra una marcada preferencia por aquellas previamente dañadas por sus congéneres, debido a la composición específica de los COVs que estas liberan (Figura 2A). Este comportamiento facilita la colonización y rápida expansión de la plaga (Mérida-Torres *et al.*, 2023). Entre los compuestos asociados a esta atracción se encuentran moléculas como el α -pineno, el pseudocumeno y el limoneno, que actúan como señales químicas detectables por el ácaro (Figura 1) (Mérida-Torres *et al.*, 2023). Por otro lado, se ha demostrado que los machos de *T. urticae* muestran una

fuerte atracción hacia el color amarillo, además de responder de manera sensible a compuestos como el farnesol, el nerolidol y el citronelol, los cuales han sido propuestos como posibles componentes feromonales (Figura 1) (Royalty *et al.*, 1993). Sin embargo, la efectividad de esta feromona aún requiere ser confirmada bajo condiciones de campo para validar su función ecológica. Este tipo de hallazgos abre la posibilidad de diseñar trampas cromáticas de nueva generación, que integren de forma sinérgica señales visuales y químicas para mejorar la captura y el monitoreo de la plaga en sistemas agrícolas.

EL TRIPS OCCIDENTAL DE LAS FLORES

El trips es un insecto diminuto que ocasiona daños directos al raspar flores, hojas tiernas y frutos, y daños indirectos al transmitir virus como los tospovirus, que reducen significativamente la productividad (Figura 2A, C). En cultivos de fresa, se ha demostrado que *Frankliniella occidentalis* ajusta su comportamiento de infestación según los volátiles emitidos por las plantas. Por ejemplo, puede sentirse atraído tanto hacia plantas sanas como hacia aquellas previamente infestadas por la araña roja (*T. urticae*), lo que sugiere una posible secuencia de ataque cuando ambas plagas coinciden en el cultivo (Zhang *et al.*, 2022; Mérida-Torres *et al.*, 2024). Además, no solo los COVs de las plantas influyen en esta interacción: también los volátiles emitidos por los adultos y huevos de *T. urticae* podrían desempeñar un papel



© Malú Méndez Lavielle. *Blumina*.

clave en la atracción de *F. occidentalis*, ya que este trips se alimenta de los huevos de la araña roja. Esto indica que la presencia de *T. urticae* puede facilitar el establecimiento de *F. occidentalis*, generando un escenario de infestación más complejo y difícil de manejar en los cultivos de fresa. Por otro lado, se sabe que *F. occidentalis* presenta una marcada atracción hacia determinados colores, en especial el azul y el amarillo, además de responder de manera sensible a diversos compuestos volátiles como el eugenol y el (S)-2-metilbutanoato de nerilo (Figura 1) (Cruz-Esteban *et al.*, 2020; Cruz-Esteban, 2024). Este conocimiento ha sido aprovechado en el desarrollo de trampas cromáticas mejoradas, que combinan estímulos visuales y químicos para potenciar

su eficacia. La sinergia entre ambos tipos de señales permite incrementar la captura de individuos adultos y optimizar el monitoreo de las poblaciones en campo. Estas herramientas representan un ejemplo claro de cómo la investigación en ecología química puede traducirse en innovaciones prácticas para la agricultura, ofreciendo alternativas más selectivas y sostenibles frente al uso intensivo de insecticidas.

IMPLICACIONES PARA UN MANEJO AGRÍCOLA SOSTENIBLE

El estudio del lenguaje químico de la fresa abre oportunidades para una agricultura más sostenible. El desarrollo de trampas cromáticas aromáticas con atractivos sintéticos basados en COVs puede optimizar el monitoreo y control de plagas (Figura 1; El-Sayed *et al.*, 2006; Cruz-Esteban *et al.*, 2020; Cruz-Esteban,

2024). Además, la selección de variedades de fresa menos atractivas para *T. urticae* y *F. occidentalis* representa una estrategia prometedora para reducir infestaciones (Zhang *et al.*, 2022; Mérida-Torres *et al.*, 2023). Por último, la implementación de estrategias agroecológicas adaptadas a las condiciones locales favorece la acción de enemigos naturales y disminuye la dependencia de insecticidas de amplio espectro (Mérida-Torres *et al.*, 2024).

Una de las principales limitaciones de estas técnicas son sus elevados costos, lo que dificulta su adopción por los agricultores. No obstante, si se consideraran los daños ambientales y a la salud que podrían prevenirse mediante la implementación de estas estrategias en el manejo integrado de plagas, se evidencia que su aplicación resulta cada vez más necesaria.

CONCLUSIÓN

La fresa es un cultivo de alto valor económico; y es un organismo dinámico que mantiene un constante diálogo químico con su entorno. A través de la emisión de COVs que señalizan su estado fisiológico, atrae polinizadores y puede incluso atraer enemigos naturales de las plagas. Sin embargo, este sofisticado sistema de señales también puede ser interceptado: plagas como la araña roja de dos manchas y el trips occidental de las flores han aprendido a detectar y aprovechar este lenguaje químico para localizar con mayor eficacia a su hospedero. Comprender estas interacciones amplía nuestro conocimiento científico sobre la ecología de cultivos y abre la puerta al desarrollo de estrategias de manejo innovadoras, como trampas cromáticas cebadas con aromas específicos, selección de variedades menos atractivas o prácticas agroecológicas adaptadas a cada región.

REFERENCIAS

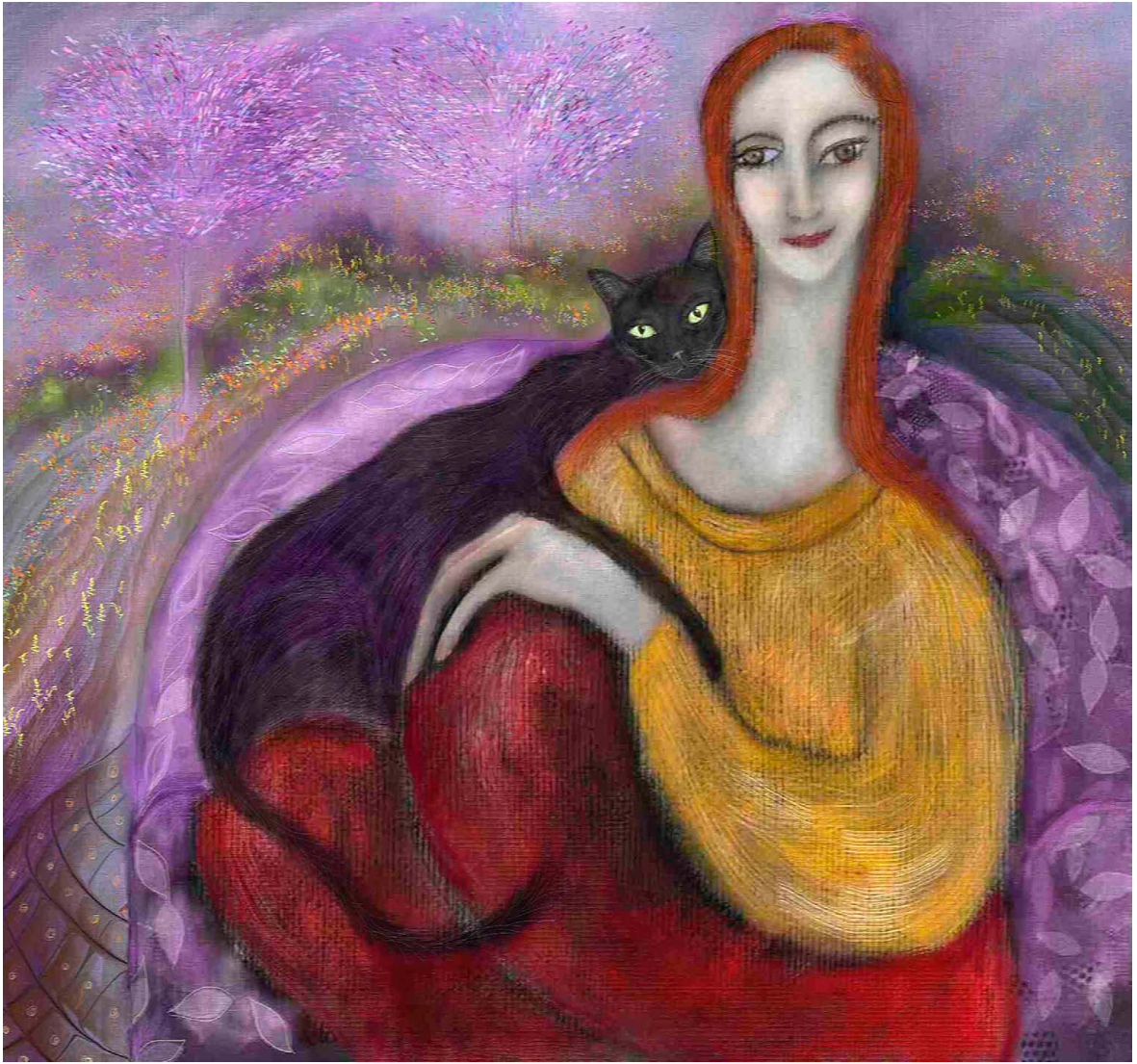
- Bruce TJ and Pickett JA (2011). Perception of plant volatile blends by herbivorous insects—finding the right mix. *Phytochemistry* 72(13):1605-1611. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2011.04.011>.
- Cruz-Esteban S (2024). Colour shade and chemical influences on the capture of adults *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae) in blackberry crops. *Journal of Applied Entomology* 148(1):106-116. <https://doi.org/10.1111/jen.13213>.



© Malú Méndez Lavielle. *Estrambótico*.

- Cruz-Esteban S, Rojas JC and Hernández-Ledesma P (2020). Trap colour and aggregation pheromone dose affect the catch of western flower thrips in blackberry crops. *Journal of Applied Entomology* 144(9):755-763. <https://doi.org/10.1111/jen.12815>.
- Dudareva N, Negre F, Nagegowda DA and Orlova I (2006). Plant volatiles: recent advances and future perspectives. *Critical Reviews in Plant Sciences* 25(5):417-440. <https://doi.org/10.1080/07352680600899973>.
- El-Sayed AM, Suckling DM, Byers JA, Jang EB and Wearing CH (2009). Potential of "lure and kill" in long-term pest management and eradication of invasive species. *Journal of Economic Entomology* 102(3):815-835. <https://doi.org/10.1603/029.102.0301>.
- Mérida-Torres NM, Cruz-López L, Malo EA and Cruz-Esteban, S (2023). Attraction of the two-spotted spider mite, *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae), to healthy and damaged strawberry plants mediated by volatile cues. *Experimental and Applied Acarology* 91(3):413-427. <https://doi.org/10.1007/s10493-023-00852-w>.
- Mérida-Torres NM, Garay-Serrano E and Cruz-Esteban S (2024). Effect of variation in plant-emitted volatiles on the infestation behavior of *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae) and *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae) in strawberry crops. *Experimental and Applied Acarology* 93(4):817-830. <https://doi.org/10.1007/s10493-024-00963-y>.
- Royalty RN, Phelan PL and Hall FR (1993). Comparative effects of form, colour, and pheromone of two spotted spider mite quiescent deutonymphs on male guarding behaviour. *Physiological Entomology* 18(3):303-316. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3032.1993.tb00603.x>.

Neby M. Mérida-Torres
Departamento de Agricultura
Sociedad y Ambiente
El Colegio de la Frontera Sur
Samuel Cruz-Esteban
Investigador independiente
Tapachula, Chiapas
cruzestebansam@gmail.com



© Malú Méndez Lavielle. *Peliroja*.



Entre el miedo y la fascinación: repensar nuestra relación con la fauna local

Iván **Flores-Santiago**
Martha L. **Baena**

¿Cuántos de nosotros, al ver por primera vez a un animal desconocido, lo consideramos peligroso solo por su aspecto? La forma, el color o incluso el movimiento pueden despertar miedo o rechazo. Este tipo de reacciones generalmente se debe a la influencia de la información proveniente de los medios masivos que privilegian especies carismáticas (tigres, elefantes, hienas, entre otras). Sin duda, estas especies de animales, también conocidas como fauna silvestre, despiertan admiración, pero eso opaca el conocimiento de las especies locales. Es sorprendente saber que, en un país megadiverso como México, se encuentran alrededor de 5,700 especies entre mamíferos, aves, reptiles y anfibios; muchas de estas especies son endémicas, o sea, que solo se encuentran en México (Mayani-Parás *et al.* 2021). Conocer esta diversidad se traduce en un acto de descubrimiento y también de reconciliación con nuestro entorno, y cuando tenemos información sobre dónde viven, cómo se alimentan, cómo se reproducen o si realmente representan un peligro, transformamos la ignorancia en respeto.

Del conocimiento a la convivencia: cómo interpretamos y actuamos frente a la fauna local

El conocimiento, la percepción y las prácticas se influyen mutuamente y están mediadas por factores culturales y sociales. Comprender esta relación es clave para conservar.

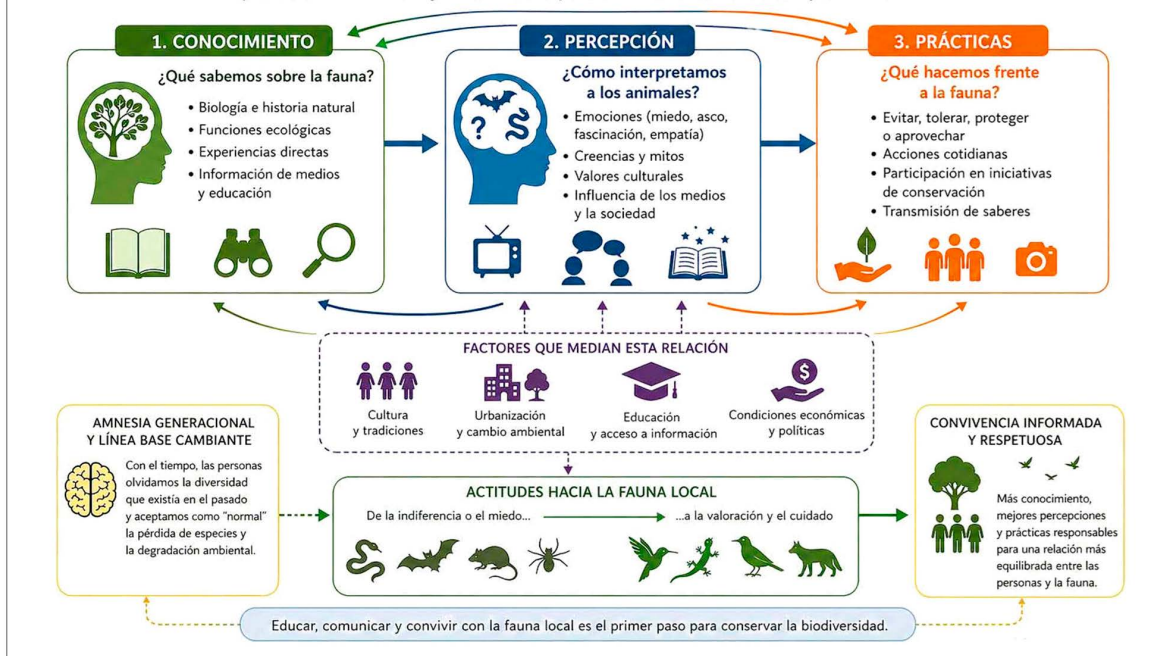


Figura 1. Relación entre conocimiento, percepción y prácticas en la interacción con la fauna local. El esquema muestra cómo la información y las experiencias influyen en la manera en que interpretamos a los animales y en las acciones que adoptamos hacia ellos. Factores sociales y culturales, así como procesos como la amnesia generacional y la línea base cambiante, median esta relación y condicionan nuestra forma de convivir con la biodiversidad.

CONOCIMIENTO, PERCEPCIÓN Y PRÁCTICA: TRES PILARES PARA LA CONSERVACIÓN

El conocimiento sobre la fauna de un determinado lugar y su relación con los humanos ha sido importante para la conservación, ya que es más difícil cuidar lo que no se conoce (Balmford *et al.*, 2002). Por lo que el conocimiento puede permitir a las personas una mayor comprensión de la biodiversidad local (Nima *et al.* 2025). Mediante el conocimiento se pueden comprender aspectos fundamentales sobre la fauna local, como identificar por sus nombres a las especies, saber sobre su origen, las interacciones con otras especies, su distribución y conocer cómo ciertas actividades pueden derivar en funciones ecosistémicas. Por ejemplo, algunos animales como el coatí de la especie *Nasua nasua* se alimentan de frutos y semillas que, al defecarlas, son dispersadas, por lo que promueve el flujo

genético de las plantas cuando el coatí se mueve entre fragmentos de bosque y zonas perturbadas (Alves-Costa *et al.* 2007).

Se ha planteado que el conocimiento depende de factores como la edad, la educación y el contacto que las personas tienen con la naturaleza (Bjerke y Østdahl 2004). Un estudio en una escuela rural de la Selva Maya en México confirma que el mayor nivel de conocimiento se alcanza en la escuela primaria, pero disminuye con la pubertad en la secundaria, quizá porque las preocupaciones y motivaciones están enfocadas en el uso de computadoras y teléfonos inteligentes, invirtiendo más tiempo en redes sociales y videojuegos que en estar en contacto con la naturaleza (Pérez-Flores y López-Martínez 2025). La desconexión con la naturaleza ha sido estudiada bajo la hipótesis del síndrome de "línea base cambiante", que consiste en la amnesia generacional sobre la pérdida de la diversidad. En este sentido, la degradación de las condiciones ambientales es percibida como "normal" en cada generación sucesiva,

lo que lleva a una subestimación de la verdadera magnitud del cambio ambiental a largo plazo a escala global (Jones *et al.* 2020). Este breve panorama descrito sobre el conocimiento nos permite entender que el conocimiento es complejo y no puede aplicarse universalmente, debido a la gran diversidad cultural y étnica de las regiones rurales en todo el mundo (Shawon *et al.* 2025).

En cuanto a la percepción, esta influye en las actitudes y valores hacia los animales y las iniciativas de conservación. Si percibimos a un animal como peligroso o inútil, será casi imposible desarrollar empatía hacia él. Finalmente, las prácticas –como proteger hábitats, reducir la caza, mitigar los conflictos entre los seres humanos y la vida silvestre o participar en iniciativas de conservación– surgen como consecuencia de cómo pensamos y sentimos respecto a las demás especies. De ahí que la actitud afectiva de las personas hacia la naturaleza es crucial, ya que se plantea que puede ser más influyente que el conocimiento en la participación de las personas en la conservación de la biodiversidad. Este es un reto complejo porque abarca aspectos sociales, educativos, culturales y religiosos (Shawon *et al.*, 2025), pero cuando se logra integrar el conocimiento, la percepción y la práctica, la convivencia entre humanos y fauna es posible. Además, estos tres componentes pueden generar cambios importantes para el futuro de la gestión y conservación sostenibles de la vida silvestre (Figura 1).

MITOS QUE OSCURECEN LA REALIDAD

Los mitos, cuentos y leyendas han acompañado por siglos nuestra relación con los animales. En ellos, la fauna suele representarse con cualidades mágicas, malignas o heroicas, muchas veces exagerando su ferocidad o toxicidad. Todo esto contribuye a construir imaginarios que se alejan de la realidad biológica. Un caso crítico es el de las serpientes. Por ejemplo, la víbora de coral (género *Micrurus*) es objeto de mitos como el que “pica con la cola”. En realidad, poseen una dentición proteroglifa (colmillos pequeños y fijos en la parte delantera de la

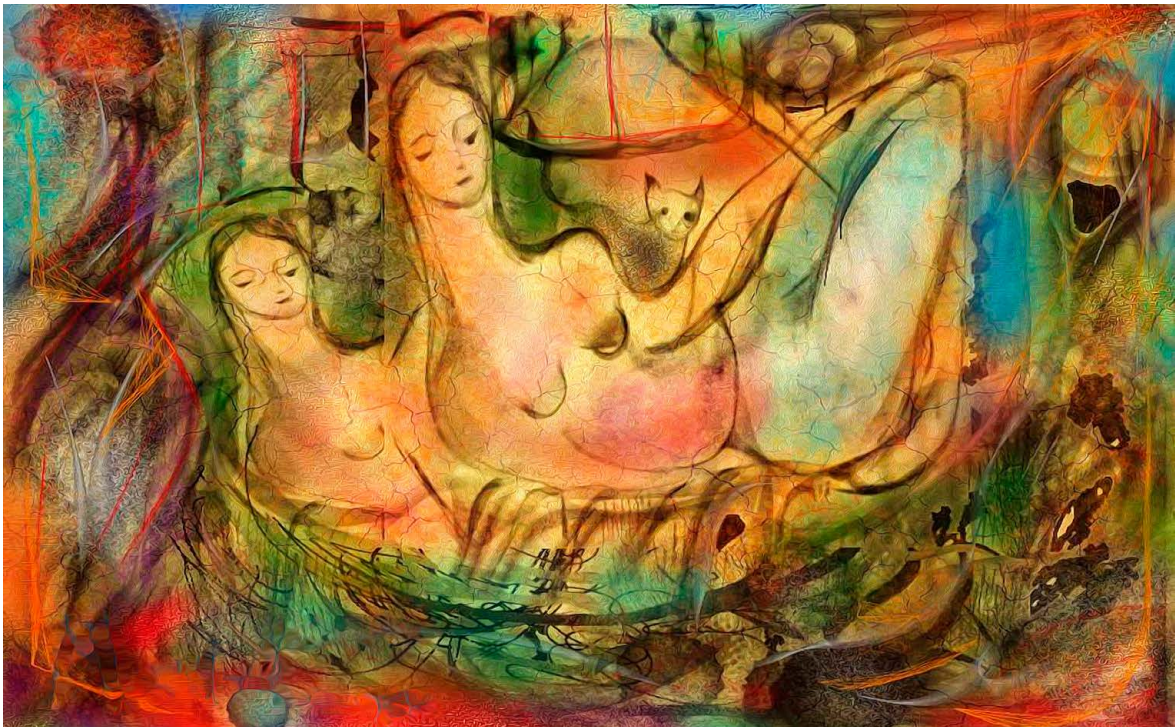
mandíbula) y su comportamiento es predominantemente elusivo.

Otro caso emblemático es el de los murciélagos, que suelen ser estigmatizados como vectores de enfermedades, pero la mayoría no se alimentan de sangre, sino de insectos o frutas. De acuerdo con estos hábitos de alimentación, los murciélagos son considerados como controladores naturales de plagas agrícolas y polinizadores de plantas de importancia económica y de sistemas naturales, procesos que son vitales para la resiliencia de los ecosistemas. Incluso en nuestros hogares habitan los geos caseros (*Hemidactylus frenatus*), conocidos en algunas regiones como “besuconas” (Cupul Cicero *et al.* 2019). Aunque frecuentemente son rechazados por su aspecto translúcido, estos reptiles son depredadores de insectos domésticos, integrándose en una red trófica que reduce la presencia de organismos molestos sin necesidad de químicos.

HACIA UNA CULTURA CIENTÍFICA DE LA CONVIVENCIA

Nos encontramos en una época marcada por la pérdida acelerada de la biodiversidad, pero entre las soluciones a este problema se contemplan varias alternativas. Por un lado, existe apoyo de gobiernos e iniciativas privadas en la creación de áreas como santuarios, parques o reservas naturales y urbanas, con la finalidad no solo de proteger la fauna sino también de mantener una reconexión humano-naturaleza.

Lo anterior es apoyado por la investigación científica que, al brindar información precisa, amplía el conocimiento de la fauna local y su relación con el entorno. Otras formas de solución comprenden enfoques transdisciplinarios que integran la ciencia, el arte y la diversidad cultural para promover esfuerzos de conservación inclusivos y sensibles al contexto (Zhu y Rozzi, 2026). También los problemas de conservación a menudo requieren una amplia participación ciudadana. En este sentido, la educación informal es una vía importante para



© Malú Méndez Lavielle. *Columpio*.

involucrar al público en la concientización de la naturaleza, y suele tener lugar en museos de historia natural, zoológicos o acuarios. Adicionalmente, la ciencia ciudadana permite vincular la observación, la documentación local y la acción informada de los participantes. Al registrar la fauna, el ciudadano se vincula activamente con su entorno para generar datos que ayudan a entender la biodiversidad local (Forrester *et al.*, 2017). Cualquiera de estas soluciones puede generar respeto y comprensión de la complejidad de la vida.

REFERENCIAS

- Alves-Costa CP and Eterovick PC (2007). Seed dispersal services by coatis (*Nasua nasua*, Procyonidae) and their redundancy with other frugivores in southeastern Brazil. *Acta Oecologica* 32(1):77-92.
- Balmford A, Clegg L, Coulson T and Taylor J (2002). Why conservationists should heed Pokémon. *Science* 295(5564):2367-2367.
- Bjerke T and Østdahl T (2004). Animal-related attitudes and activities in an urban population. *Anthrozoös* 17(2):109-129.
- Cupul Cicero V, Aguilar Cordero WDJ, Chabé Santos J y Sélem Salas CI (2019). Conocimiento etnozoológico de la herpetofauna de la comunidad maya de Santa Elena, Yucatán, México. *Estudios de Cultura Maya* 54:285-314.
- Forrester TD, Baker M, Costello R *et al.* (2017). Creating advocates for mammal conservation through citizen science. *Biological Conservation* 208:98-105.
- Mayani-Parás F, Botello F, Castañeda S *et al.* (2021). Cumulative habitat loss increases conservation threats on endemic species of terrestrial vertebrates in Mexico. *Biological Conservation* 253:108864.
- Nima P, Dorji T, Rana MS and Dorji T (2025). Knowledge, attitude, perceived threats and conservation challenges of the critically endangered white-bellied heron (*Ardea insignis*) in Bhutan. *Global Ecology and Conservation* 58:e03484.
- Pérez-Flores J and López-Martínez JO (2025). Understanding wildlife biodiversity awareness: rural children's knowledge, attitudes and perceptions of conservation in the Selva Maya. *Diversity* 17(3):152.
- Shawon RAR, Rahman MM, Dandi SO *et al.* (2025). Knowledge, perception, and practices of wildlife conservation and biodiversity management in Bangladesh. *Animals* 15(3):296.
- Zhu D and Rozzi R (2026). Biocultural communication: arts and sciences for conserving biological and cultural diversity. In Rozzi R (Ed.), *Linking arts with biocultural conservation, restoration, and communication* (pp. 1-22). Switzerland: Springer Nature.

Iván Flores-Santiago
Martha L. Baena
Instituto de Investigaciones Biológicas
Universidad Veracruzana, Xalapa
mbaena@uv.mx

50 Congreso Mexicano de la Ciencia del Suelo

La Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. y la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, a través del Centro de investigación en Ciencias Agrícolas del Instituto de Ciencias e Instituciones organizadoras: Convocan a las y los profesores, investigadores, técnicos/especialistas, estudiantes de las universidades públicas y privadas, institutos y centros de investigación, empresas, productores, campesinos, miembros de la sociedad civil, organismos descentralizados, organizaciones no gubernamentales y personas interesadas en las Ciencias del Suelo a participar en el **50 Congreso Mexicano de la Ciencia del Suelo**, a realizarse del 05 al 09 de octubre de 2026 en el Complejo Cultural Universitario de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Con la finalidad de que quienes participen tengan oportunidad de intercambiar conocimientos y experiencias con expertos de otros países, se han incluido actividades que trascienden fronteras.

Temáticas por abordar



Envía tu contribución a través del Sistema de Registro de Congresos (SRC) del 50CMCS (<https://50cmcs.com/>).

Fecha límite para registro de contribuciones:
07 de agosto de 2026

del 5 al 9 de octubre de 2026
Complejo Cultural Universitario, BUAP,
Puebla, México

Convocatoria completa en:



inifap



elementos

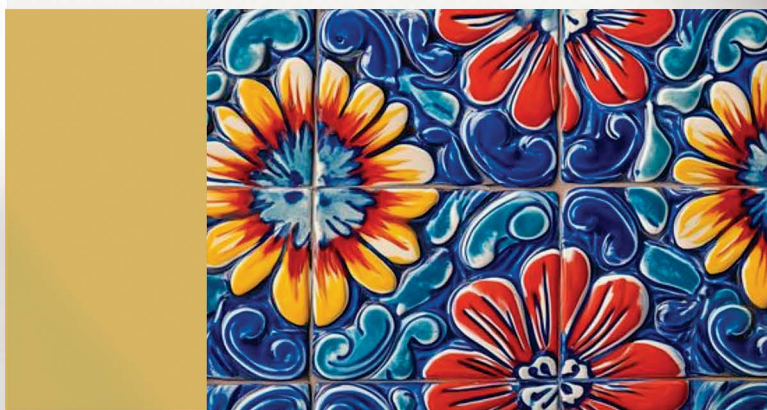
Visita nuestro sitio:
www.elementos.buap.mx



Cuadernos de **Elementos**

n ú m e r o

16



**Las locerías y los centros históricos en Puebla,
ciudad de México, Sevilla y Talavera de la Reina,
siglos XVI-XVIII**

Emma Yanes Rizo

elementos