

# elementos

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA • No. 141 • Volumen 33 • enero - marzo 2026 • \$40.00

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



00141

7 52435 06402 6

EXHIBIR HASTA EL 31-ENERO-2026

Divulgar la ciencia en un entorno de posverdad y neoscurantismo | La insulina en las adicciones | El aparecer del cuerpo propio | Más allá de lo visible en el uso de animales para investigación biomédica | Inmunoterapia: el sistema inmunitario en la batalla contra el cáncer | Carcinógenos en carnes rojas asociados al cáncer colorrectal | Salud mental en tiempos de crisis climática... | Cuando la concentración lo cambia todo: efecto dual del sulfuro de hidrógeno... | Nrf2: un salvavidas celular | Alternativas verdes contra los vectores de la enfermedad de Chagas | Germinados: una alternativa novedosa para el consumo de probióticos | Contaminación ambiental y bioindicadores | La industria automotriz y su impacto en los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU | Hongos de Oaxaca: biodiversidad, tradición y sabor | Del ataque a la defensa: el potencial oculto de los patógenos en la agricultura | De desecho a nutritivo: el frass de *Hermetia illucens* | Sin semillas, pero con vida: la clonación de pinos... | ¿El Código Masewal es un verdadero códice? | Obra gráfica: Miguel Ángel Andrade



# S U M A R I O



## BUAP

**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**  
**rectora**, Ma. Lilia Cedillo Ramírez  
**secretario general**, José Manuel Alonso Orozco  
**vicerrector de investigación y estudios de posgrado**, Ygnacio Martínez Laguna

### ELEMENTOS

[www.elementos.buap.mx](http://www.elementos.buap.mx)

revista trimestral de ciencia y cultura  
número 141, volumen 33, enero-marzo de 2026

**director**, Enrique Soto Eguíbar

**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, UAEIM),

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**, © Miguel Ángel Andrade

**forros**, © De la serie *Xochipila*

### CINTILLO LEGAL

ELEMENTOS, Año 41, No. 141, enero a marzo 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 Eguíbar, [esoto24@gmail.com](mailto: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 diciembre de 2025. 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



Divulgar la ciencia en un entorno de posverdad y neoscurantismo

3

Enrique Soto Eguíbar

La ínsula en las adicciones

II

Eduardo Hernández-Ortiz

El aparecer del cuerpo propio:

¿cómo es que nos apropiamos de cierta habilidad?

21

Rubén Sánchez Muñoz

Más allá de lo visible en el uso de animales para investigación biomédica

29

Patricia Frías Álvarez, Gustavo Ortiz Millán

Immunoterapia: el sistema inmunitario en la batalla contra el cáncer

37

Leonardo Daniel Álvarez Coronel, Nohemí Salinas-Jazmín

Obra gráfica: ritualidades y las travesías del café

45

Miguel Ángel Andrade

Carcinógenos en carnes rojas asociados al cáncer colorrectal

49

Nadia Vianey Carrillo Reyes, Marisol Neri Sánchez

Salud mental en tiempos de crisis climática: entre el miedo y la esperanza

57

Libertad Paredes-Díaz, Yolanda Campos-Uscanga

Cuando la concentración lo cambia todo: efecto dual del sulfuro de hidrógeno en el tratamiento del dolor neuropático

63

Violeta Rangel-Galván, Maricruz Rangel-Galván

Nrf2: un salvavidas celular

71

Cinthia I. Landa-Moreno, Francisco Alfredo Saavedra-Molina

Alternativas verdes contra los vectores de la enfermedad de Chagas

77

José Rafael Delgado López, Reyna Vargas-Abasolo

Germinados: una alternativa novedosa para el consumo de probióticos

83

Luis Fernando Trujillo Castillo, José Rodolfo Velázquez Martínez

Contaminación ambiental y bioindicadores

89

Irene Romero-Nájera

La industria automotriz y su impacto en los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU

93

Israel Vivaldo de la Cruz, Luis Abraham Sánchez Gaspariano

Hongos de Oaxaca: biodiversidad, tradición y sabor

101

Alexanders López-García, Marko Gómez-Hernández

Del ataque a la defensa: el potencial oculto de los patógenos en la agricultura

107

María del Sol Cuéllar-Espejel, Gabriel Rincón-Enríquez

De desecho a nutriente: el frass de *Hermetia illucens*

113

Ezequiel Licea Rangel, Benito Parra Pacheco

Sin semillas, pero con vida: la clonación de pinos por estacas

117

Yaiza Sabrina Suárez Hernández

¿El Códice Masewal es un verdadero códice?

123

Jorge Alberto Venegas-Díaz



# Divulgar la ciencia en un entorno de posverdad y neoscurantismo

Enrique **Soto Eguibar**

El cambio en los hábitos de lectura, impulsado por la digitalización y el acceso masivo a Internet, entre otros factores, ha modificado drásticamente las condiciones de producción y consumo de contenidos científicos (Salceda, 2025). Como anticipaba Marshall McLuhan –“el medio es el mensaje”–, los medios modifican el curso y el funcionamiento de las relaciones y las actividades humanas; o, dicho de otra manera, el medio es uno de los determinantes del tipo de mensajes y del contenido de lo que se produce. Los medios que McLuhan denominó como *calientes* se caracterizan por su alta definición, claridad y sencillez, lo que facilita la comprensión del contenido. Esto reduce la necesidad de interpretación y la participación activa del receptor, quien puede consumir la información con una implicación intelectual mínima (McLuhan, 1969; McLuhan y Fiore, 1969). Hoy, los medios de divulgación de la ciencia—usualmente *fríos*—compiten con una infinidad de contenidos *calientes* en redes sociales, podcasts, videos de YouTube, TikToks y *blogs*.

## EL DESAFÍO DE LOS MEDIOS: SIMPLIFICACIÓN Y ESPECTÁCULO

Cabe señalar que los medios de comunicación, tal como ha señalado McLuhan, constituyen en sí mismos un elemento clave que introduce cambios de escala, ritmos o patrones en los asuntos que se comunican. Así, encontramos que

los medios distintos a la escritura, como la radio o la televisión, implican un ritmo de expresión rápido que por lo general no es compatible con la comunicación en ciencias, menos aún cuando se consideran las contradicciones y dudas que existen en tal o cual asunto. Ni qué decir de TikTok o de las redes sociales, que implican mensajes cortos, con contenidos precisos y “divertidos”. Terminamos, así, realizando una divulgación científica muy simplificada que no contempla contradicciones, que oculta matices y que frecuentemente lleva a aseveraciones que acaban siendo falsas. Eso sí, la calificamos de divertida. Ello obliga a que la divulgación sea realizada mayoritariamente por especialistas en el manejo de estos medios, quienes con harta frecuencia tienen un conocimiento parcial de lo que están presentando y se introducen errores o verdades a medias, con la buena intención de hacerlo claro y que no sea “aburrido”. Se usan metáforas incorrectas, ejemplos exagerados o fuera de lugar, lo que indudablemente degrada la intención de comunicación científica y contribuye a generar ideas erróneas.

Paradójicamente, resulta así que la misma tecnología que permite, o permitiría, difundir contenidos científicos con mayor alcance, también dispersa a las audiencias y amplifica discursos pseudocientíficos, teorías conspirativas, noticias falsas y desinformación. Durante la pandemia por COVID-19, esta tensión fue especialmente evidente. El objetivo de estos medios no es informar, sino generar tráfico en los sitios para vender publicidad (Badiollo, 2025).

#### EL MARCO FILOSÓFICO: POSMODERNISMO, POSVERDAD Y RELATIVISMO

Si ponemos esto en un contexto posmoderno, encontramos que el lenguaje ya no describe la realidad, sino que la inventa: el mapa se come al territorio. Hoy vivimos en hiperrealidades en las que los algoritmos nos dicen qué desear antes de que lo sepamos; las redes sociales son el sueño posmoderno (Baudrillard, 1978).

Si algo caracteriza a lo posmoderno es el rechazo de las ideas de progreso y verdad, al tiempo que se abraza al relativismo y al subjetivismo (de ser posible, “cuánticos”). La comunicación de la ciencia enfrenta dos grandes problemas: uno, la posverdad, en la que se relegan los hechos objetivos y se forma opinión pública suscitando la emoción y las creencias personales. La posverdad puede distorsionar deliberadamente la realidad con fines políticos, ideológicos o económicos. El otro, el relativismo corriente, que niega la existencia de verdades absolutas argumentando que el conocimiento y la verdad son relativos a factores como el individuo, la cultura o el contexto, y son un asunto individual: la verdad es, verdaderamente, incognoscible. Con ello se ecualiza el conocimiento y el saber académico tiene así el mismo valor que cualquier opinión. Lo importante es lo controversial o polémico, que suscita interés, siembra dudas y produce *likes*.

El relativista confunde el deber de respetar a la persona que opina y su derecho a opinar con el deber de respetar toda opinión. Pero en realidad no tenemos por qué aceptar todas las opiniones, por

© Miguel Ángel Andrade. De la serie *Xochipila*.





© Miguel Ángel Andrade. De la serie *Xochipila*.

el simple hecho de que no todas las opiniones son válidas. Incluso, tenemos el deber de refutar las opiniones falsas y dañinas (García de Yegüez, 2011).

Debemos anotar que el relativismo tiene una lógica que, estrictamente, es correcta; el buen juicio nos lleva claramente a la conclusión de que los argumentos totalizadores y el científicismo son incorrectos, en muchos casos refieren a la vanidad, y en términos académicos entendemos que, si existe una verdad, esta tiene un carácter estadístico. La racionalidad dialógica entre pares existe y debe promoverse, pero en medios y ante audiencias académicas. La equidad epistémica vale, pero siempre y cuando compartamos cosmovisiones y la idea misma de equidad, y no haya de por medio creencias definitivas que empantanen toda discusión. Cabe anotar que, si el relativismo estricto fuese cierto, también sería cierta la tesis contraria; luego, el relativismo es falso (Platón, 369/368 a.C.).

La desinformación digital contribuye a complicar el panorama de la comunicación de la ciencia, que hace uso de las redes sociales para difundir teorías conspirativas o pseudocientíficas, erosionando la

confianza en fuentes verificadas, llegando así al relativismo extremo que lleva a equiparar opiniones infundadas con hechos (“toda verdad es subjetiva”, claman sus defensores), socavando el diálogo racional. Y aquí hay que señalar a los fanatismos ideológicos y a los dogmatismos políticos, religiosos o culturales que censuran el pensamiento crítico.

#### NEOSCURANTISMO: LA NEGACIÓN DEL CONOCIMIENTO

Estas ideas surgen en parte debido a que se ha disparado (¿o se ha promovido?) una crisis de confianza en instituciones tradicionales (gobiernos, academia, medios). Grupos que promueven la ignorancia para mantener un cierto control (por ejemplo, corporaciones negando daños ambientales). Por otra parte, en la era digital, hay una sobrecarga informativa –infodemia– que dificulta discernir entre hechos y falsedades.

El problema es, como ya mencioné, que el posmodernismo y el relativismo ecualizan todos los discursos, no en el buen sentido de la racionalidad dialógica



© Miguel Ángel Andrade. De la serie *Xochipila*.

o la equidad epistémica, llevándonos así al silencio académico y al ocultamiento de la ciencia. Hoy se habla de los saberes, los puntos de vista, la enorme importancia de las experiencias individuales, las emociones y las opiniones. Recientemente, en una estación de radio en Puebla, una locutora argumentaba alegremente que lo importante es opinar, aunque no sepamos nada del tema. Así estamos...en lo oscuro.

Por otra parte, en referencia al oscurantismo y en particular al “neoscurantismo”, no es un concepto claramente definido, pero puede interpretarse como un resurgimiento de actitudes o ideologías que rechazan el conocimiento racional, científico o el progreso intelectual, similar al oscurantismo histórico. Hoy, podría asociarse a fenómenos como la negación de la ciencia (rechazo a consensos científicos: cambio climático, vacunas, etcétera) basada en creencias políticas o intereses económicos.

En el contexto científico y de la difusión de información, el neoscurantismo se manifiesta como un conjunto de barreras que distorsionan, ocultan

o niegan el conocimiento científico, ya sea por intereses particulares, sesgos ideológicos o dinámicas mediáticas.

#### AMENAZAS CONCRETAS A LA CIENCIA: NEGACIONISMO Y DESINFORMACIÓN

En términos generales, hay cuatro aspectos centrales que afectan negativamente a la ciencia y a la comunicación científica y que eventualmente, si se tiene ánimo, deben combatirse; son: el negacionismo científico, la desinformación y la pseudociencia, la mercantilización del conocimiento y la polarización política de la ciencia. A continuación, abordo algunos casos notables relacionados con estos aspectos.

El negacionismo es uno de los recursos más efectivos para devaluar el conocimiento científico; se trata de la creación artificial de controversias donde no las hay. Esta estrategia consiste en presentar un tema con consenso científico como si fuera un campo de batalla intelectual entre posturas igualmente válidas. El objetivo es sembrar duda pública, retrasar políticas regulatorias y mantener el *statu quo*.

El proceso del falso debate muestra patrones recurrentes como el dar voz a un pequeño grupo de científicos disidentes (a menudo con conflictos de interés) o a “expertos” sin credenciales relevantes. Se presenta el tema como “un bando vs. otro”, ignorando la proporción real de trabajos científicos que apoyan un conocimiento. También se descontextualiza la evidencia citando estudios obsoletos, preliminares o retractados, para simular discordia.

Un caso bien conocido es el de la industria tabacalera, que mantuvo durante años un falso debate sobre el tabaquismo y el cáncer. Se sabe ahora claramente que las empresas tabacaleras financiaban científicos para publicar dudas sobre las relaciones causales entre tabaquismo y cáncer (Oreskes, 2018).

Algo similar ocurre con la relación entre combustibles fósiles y cambio climático, pseudodebate que inició en el año 1990 y llega hasta nuestros días. La estrategia se ha basado en desarrollar centros de estudios que han promovido conferencias y numerosos trabajos donde climatólogos marginales han negado el consenso científico sobre el cambio climático.



© Miguel Ángel Andrade. De la serie Xochipila.

Ellos típicamente usan un lenguaje de neutralidad aparente, pese a que el 99 % de los estudios recientes confirman el origen humano del calentamiento global. Como resultado, se ha retrasado la aplicación real de los protocolos de Kioto y de París.

En resumen, se trata de un conjunto de estrategias dirigidas a desacreditar la ciencia, difundir información falsa, sembrar confusión y promover la duda (McKie, 2018). Como dice Badillo (2025):

En la era de la posverdad, la duda y la controversia abren el camino a ideas que antes no tenían cabida en la arena pública. Cualquier cosa puede aceptarse porque siempre existe el “beneficio de la duda”.

Otro aspecto hoy muy significativo, y que entorpece el avance de la ciencia y sus aplicaciones, es, como ya mencionamos, la desinformación, impulsada enormemente por las redes sociales. Entre otros elementos, han promovido los movimientos antivacunas y se han creado mitos diversos que son particularmente notables y dañinos en el área médica.

#### PSEUDOCIENCIA, MERCANTILISMO Y POLITIZACIÓN

Usualmente, un solo estudio fraudulento asociado a intereses económicos y a una difusión masiva origina ideas que no tienen ningún soporte, dando lugar a conductas de rechazo, negación y eventualmente hasta de pánico, como sucedió cuando a algún sujeto se le ocurrió que en algunas zonas de EUA estaban usando la fumigación mediante aviones para afectar a la población. La evidencia: las estelas de condensación que dejan los aviones y que fueron vistas y presentadas como prueba del complot. El efecto dominó de la desinformación llevó a desatar un pánico colectivo que se propagó también a España.

Uno de los aspectos que más gravemente perturba el proceso de conocimiento científico y sin duda a la comunicación en ciencia es el de la pseudociencia. Se presentan como científicas creencias o afirmaciones que no están adecuadamente basadas en evidencias empíricas que se hayan obtenido poniendo



© Miguel Ángel Andrade. De la serie *Xochipila*.

realmente a prueba las causas y los elementos que las originan. Se carece de evidencia estadística, haciendo aparecer como verdad afirmaciones que, cuando se examinan con seriedad, son absurdas y se basan en anécdotas, y se sostienen dogmáticamente, pero siempre usando de forma ilegítima la terminología científica. Ejemplo de pseudociencia lo es la homeopatía, la astrología y el terraplanismo, entre otras.

Estas visiones seudocientíficas persisten porque hay foros donde sus devotos se validan mutuamente y además son un buen negocio: se venden libros, hay conferencias y mercancías (camisetas con el slogan “El GPS te miente”). En el caso de la homeopatía, que se autoproclama como un saber demostrado científicamente, tiene un corpus de creyentes y acólitos que la defienden y la promueven formalmente, hasta el grado de haberla convertido en una “licenciatura médica”. Finalmente, se produce un sesgo cognitivo por el cual las personas con poca habilidad o conocimiento en un área tienden a sobreestimar sus capacidades (el llamado efecto Dunning-Kruger), y gente sin formación científica se siente “iluminada” descubriendo “lo que nos ocultan”.

Finalmente, está el problema del mercantilismo y la politización de la ciencia. El caso más conocido del

grave efecto de la politización del conocimiento científico fue el Lysenkismo promovido en la Unión Soviética y que resultó en un desastre para la producción agrícola. Cabe considerar que este caso no es único y que

[...] la subordinación, o la dependencia de la investigación con respecto al capital económico o a la política, sea donde sea, puede producir –y de hecho produce– el efecto de un obstáculo al limitar la libertad e intuición del investigador científico para abordar tal o cual asunto, por el contrario, hipertrofiando algunos temas de investigación “prioritarios” (Ledesma 1986).

De hecho, el modelo desarrollista tecnocrático ha promovido el progreso de dos ciencias de manera vertiginosa. Una, la mecánica cuántica, por la necesidad de obtener un arma mortífera capaz de imponer en todo el mundo la hegemonía de su poseedor; la otra, la genética, que se desarrolló con la idea de demostrar la superioridad “natural” de una etnia sobre las demás y que actualmente es impulsada por el afán de vivir largas vidas por los ricos y superricos (Olarieta Alberdi, 2008).

El mercantilismo es bien conocido y lleva a clamar de forma directa falsedades con el afán de producir riqueza en grupos de sujetos sin miramientos éticos

de ningún tipo. Es tanto o más dañino que el caso de la politización de la ciencia, ya que es mucho más extendido y común y, en muchos casos, produce grave daño social. Resurgen casos aquí y allá. Tal es, por ejemplo, el escándalo de Purdue Pharma (cuyos directivos y dueños) influyeron de diversas maneras en todos los ámbitos de la ciencia médica para convencernos (yo estuve convencido) de que los opioides eran inocuos y que podían usarse ampliamente, especialmente el OxyContin, vendido por Purdue Pharma como un medicamento “sin riesgo de adicciones” (Radden Keefe, 2021). Da inicio así uno de los capítulos más tristes de la ciencia médica, engañada por sus socios comerciales, y que produjo una epidemia de adicciones a los opioides en los Estados Unidos. La mentada epidemia de fentanilo que hoy se vive es una secuela del desastre que organizaron los miembros de la familia Sackler, dueños de Purdue Pharma.

Otro caso es el de la empresa Monsanto, que financió estudios que demostraban que el glifosato no es cancerígeno, pese a que la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) de la Organización Mundial de la Salud (OMS) lo clasificó como “probable carcinógeno” en 2015.

En todos estos casos, las corporaciones redactan estudios y pagan a académicos para firmarlos. Solo se difunden resultados favorables. Diversos lobbies influyen en agencias como la FDA o EPA para aprobar los productos o impedir que se les pongan notas de precaución o prohibiciones.

## CONCLUSIÓN

En un contexto marcado por la sobreabundancia de información, la divulgación científica responsable y bien fundamentada debe ser, sobre todo, un ejercicio ético. No obstante, esta exigencia implica el establecimiento de sistemas formales de revisión por pares, así como protocolos editoriales claros para la validación y curaduría de los contenidos, sea cual sea el medio de comunicación. El neoscurantismo científico, el posmodernismo y la posverdad son una amenaza a la democracia y la salud global, pues sin hechos compartidos, no hay soluciones efectivas a problemas globales. Pero también son síntoma de un

sistema que ha fallado en hacer de la ciencia una actividad inclusiva y comprensible. Parte de la solución al problema de la comunicación pública de la ciencia no es solo “más datos”, sino mejor comunicación, ética y acceso al conocimiento.

## R E F E R E N C I A S

- Badillo A (2025). Lo controversial como elemento del desastre. *La Tempestad*, 7 de agosto de 2025. <https://www.latempestad.mx/tornavoz-lo-controversial-como-elemento-del-desastre/>.
- Baudrillard J (1978). *Cultura y simulacro*. Barcelona: Kairós.
- Bravo García T (2016). El Centro de Salud Integral SomoSalud ya es una realidad en Somotillo (Nicaragua). *Rev. Med. Homeopat.* 3(2):106-107.
- García de Yegüez M (2011). ¿Qué es el relativismo? *Salus Online* 15-2, 1-3. <https://ve.scielo.org/pdf/s/v15n2/art01.pdf>.
- McKie RE (2018). Climate Change Counter Movement Neutralization Techniques: A Typology to Examine the Climate Change Counter Movement. *Sociological Inquiry* 89(2):1-29. DOI: <https://doi.org/10.1111/soin.12246>.
- McLuhan M (1969). *La comprensión de los medios como las extensiones del hombre*. México: Diana.
- McLuhan M y Quentin F (1969). *El medio es el masaje*. Buenos Aires: Paidós.
- Ledesma I (1986). La cuestión de Lysenko. *Ciencias* 9:54-61. <https://www.revistacienciasunam.com/images/stories/Articles/9/CNS00906.pdf>.
- Olarieta Alberdi JM (2008). El linchamiento de Lysenko. *Nómadas. Critical Journal of Social and Juridical Sciences* 20(4):1-96.
- Oreskes N y Conway EM (2018). *Mercaderes de la duda. Cómo un puñado de científicos ocultaron la verdad sobre el calentamiento global*. España: Capitán Swing.
- Platón (369/368 a.C.). *Teeteto* (2006 ed.) Buenos Aires: Losada.
- Radden Keefe P (2021). *El imperio del dolor: la historia secreta de la dinastía que reinó en la industria farmacéutica*. USA: Reservoir Books.
- Salceda E (2025). ¿Tienen futuro las revistas de divulgación en México? Desafíos en la era digital. *Elementos* 140:3-7. <https://elementos.buap.mx/directus/storage/uploads/00000013209.pdf>.
- Schwarz J (2017). *Homeopathy-Delusion through Dilution*. Oficina de Ciencia y Sociedad, McGill University. [https://www-mcgill-ca.translate.goog/oss/article/homeopathy/homeopathy-delusion-through-dilution?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=es&\\_x\\_tr\\_hl=es&\\_x\\_tr\\_pto=tc](https://www-mcgill-ca.translate.goog/oss/article/homeopathy/homeopathy-delusion-through-dilution?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc).
- Vargas CC y Giraldo M (2012). “*Constelaciones Familiares*” Fundamentación sistémica de Bert Hellinger. Área: Educación. Bogotá, Colombia. <https://centrohumanista.edu.mx/biblioteca/files/original/0023d81e1bf050483b1db524c3206d3f.pdf>.

**Enrique Soto Eguibar**  
**Instituto de Fisiología**  
**Benemérita Universidad Autónoma de Puebla**  
**[esoto24@gmail.com](mailto:esoto24@gmail.com)**

© Miguel Ángel Andrade. De la serie Xochipila.



# La ínsula en las adicciones

**Eduardo Hernández-Ortiz**

“Un modelo es una mentira que te ayuda a conocer la verdad.”

*Howard Skipper*

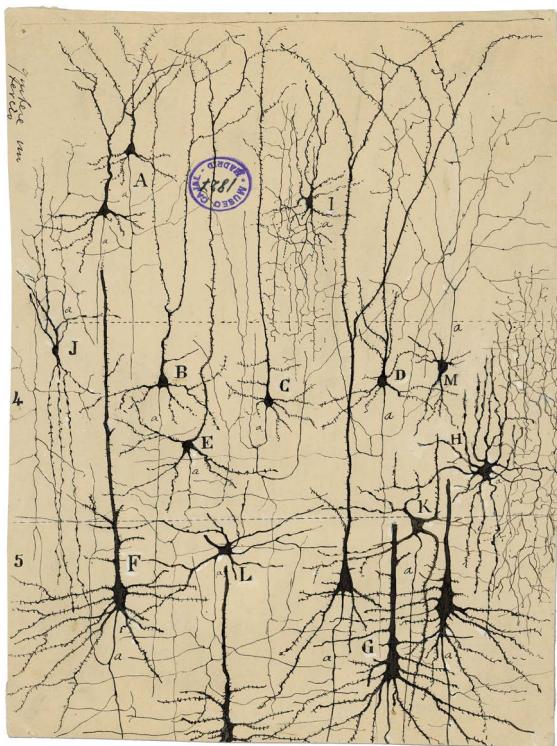
A lo largo de la evolución biológica se han seleccionado mecanismos conductuales en los animales que nos permiten responder de manera inmediata a las señales del ambiente. Por ejemplo, acercarnos a estímulos gratificantes o alejarnos de aquellos que comprometen nuestra seguridad. No obstante, las condiciones del ambiente no son estáticas y cambian continuamente con el tiempo, lo que obliga a los organismos a modificar su comportamiento de acuerdo con las exigencias del medio. Para lograr estas modificaciones, los animales presentamos un sistema biológico que nos permite hacer cambios duraderos en nuestra conducta como resultado de la experiencia. A este proceso biológico se le conoce como aprendizaje y representa el principal mecanismo de adaptación de los animales.

Los primeros estudios científicos que se realizaron sobre el aprendizaje derivaron de las observaciones realizadas por el fisiólogo ruso Iván Pavlov en 1904. Inicialmente, Pavlov estaba interesado en estudiar el funcionamiento del sistema digestivo en perros. Para ello medía la cantidad de saliva que producían los animales ante la presencia de ciertos alimentos. En algunas sesiones experimentales, los perros fueron expuestos al sonido de una campana antes

de la presentación de la comida y su respuesta de salivación fue medida. Después de varias repeticiones, Pavlov advirtió que los perros eran capaces de responder de manera anticipada a la entrega de comida con la sola presentación de la campana. Es decir, los perros habían asociado que el sonido de la campana predecía la presencia de comida, mostrando así un aumento en la salivación. Con estas observaciones, Pavlov había sentado las bases conductuales del aprendizaje y la memoria asociativa, incrementando el interés científico por estudiar sus mecanismos a nivel celular.

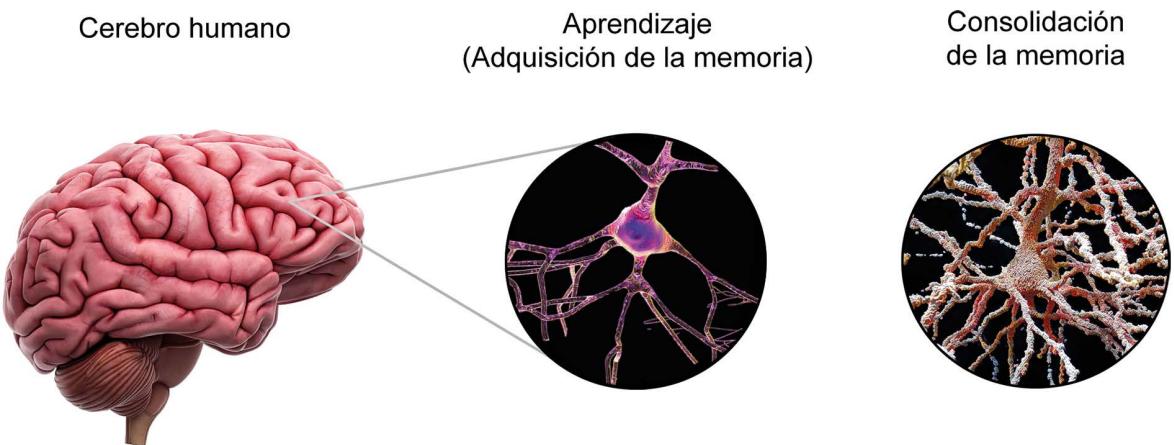
#### **MEMORIAS DE UN ANATOMISTA ¿O LA ANATOMÍA DE LA MEMORIA?**

Aunque no se conocía la estructura del sistema nervioso central cuando Pavlov estableció las bases del aprendizaje asociativo, Santiago Ramón y Cajal, un médico graduado de la universidad de Zaragoza en España, realizó aportaciones sustanciales que cambiaron la concepción sobre el funcionamiento del sistema nervioso. Ramón y Cajal implementó las técnicas de tinción de Camilo Golgi, un médico y biólogo de origen italiano que desarrolló una técnica basada en sales de plata. Con ello, Ramón y Cajal, con minucioso detalle, pudo observar las estructuras básicas de una neurona en sus preparaciones de tejido cerebral: el soma, el axón y las dendritas (Figura 1). Así, la observación detallada, combinada con su facilidad artística, le permitió a Ramón y Cajal publicar la doctrina neuronal, en la que propuso que las neuronas son células estructural y funcionalmente individuales que no están físicamente conectadas unas con otras, sino que se encuentran separadas entre sí por un espacio definido como el espacio sináptico. En estos espacios sinápticos es donde las neuronas pueden liberar moléculas mensajeras definidas e identificadas como neurotransmisores. Así, después de que Ramón y Cajal y Camilo Golgi recibieran el premio nobel por establecer las bases del funcionamiento cerebral a un nivel anatómico, nuevas interrogantes surgieron sobre los mecanismos del aprendizaje y la memoria.



**Figura 1.** Ilustración realizada por Santiago Ramón y Cajal. Muestra neuronas piramidales de la corteza cerebral del humano. Se puede apreciar el cuerpo celular o soma, los largos axones y numerosas bifurcaciones denominadas dendritas. Imágenes modificadas de [Cervantes.org](http://Cervantes.org).

Durante la primera mitad del siglo XX, Donald Hebb, un fisiólogo de origen canadiense y profesor de la Universidad de McGill, retomó las teorías que Ramón y Cajal había dejado en sus escritos. Hebb pensaba que uno de los mecanismos cerebrales que nos permiten almacenar en recuerdos, por ejemplo, los hechos de nuestra infancia, era mediante la actividad sincrónica de un número mínimo de neuronas requerido y en una configuración celular particular. Esto hacía pensar a Donald Hebb que aquellos espacios o “contactos sinápticos” que Cajal había observado bajo el microscopio tenían que ser dinámicos; es decir, las sinapsis no podían tener una configuración estática e inamovible puesto que eso limitaría la capacidad de procesamiento de la información del mundo que nos rodea. Por ello, Hebb teorizó que los espacios sinápticos tendrían que cambiar de forma y tamaño para poder almacenar los recuerdos en configuraciones particulares. Es así como estos cambios subcelulares entre los contactos sinápticos pueden fortalecerse o debilitarse a medida que dos o más neuronas, espacialmente

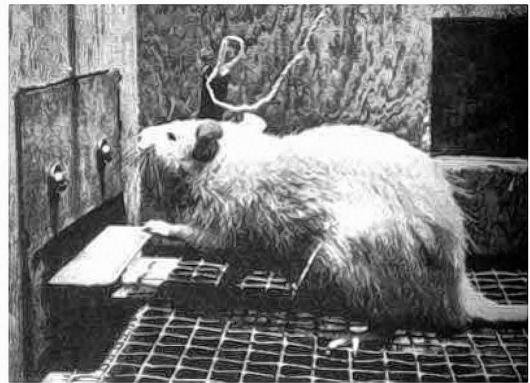
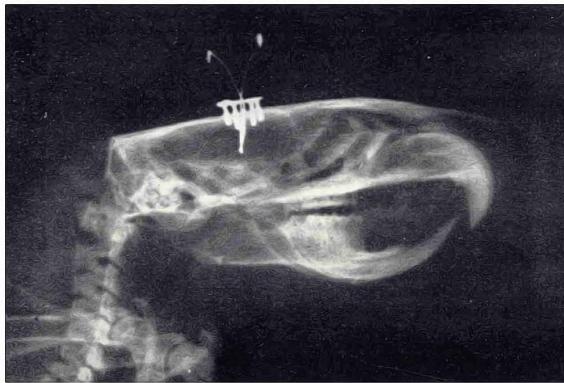


**Figura 2.** El aprendizaje y la formación de la memoria implican cambios celulares. A la izquierda, imagen de un cerebro humano. Cuando la información llega al sistema nervioso central puede activar áreas cerebrales particulares cuyas neuronas liberarán una molécula transmisora hacia la célula adyacente. Durante el aprendizaje, existirán cambios celulares que pueden ser transitorios o permanentes. La transición de una memoria de corto plazo a largo plazo involucra cambios en la actividad del material genético, la síntesis de nuevas proteínas y el crecimiento de los contactos sinápticos. Cuando ya se establecieron los cambios celulares y moleculares entre las neuronas, la información podrá ser evocada con mayor facilidad, manteniendo estas modificaciones celulares por largos períodos de tiempo como el crecimiento axonal y la formación de nuevos contactos sinápticos.

cercanas, se activan de manera simultánea. Cuando los contactos sinápticos se fortalecen es posible que, por ejemplo, una neurona “A” que se activa con la imagen de un automóvil y una neurona “B”, que simultáneamente se activa con el sonido de un claxon, hará que en el futuro podamos evocar inmediatamente la imagen de un automóvil con solo escuchar el sonido de un claxon. Así, Donald Hebb postuló que las neuronas, al activarse de manera conjunta, pueden establecer una relación más estrecha y agruparse en “asambleas neuronales”, es decir, un grupo de neuronas que establecen una relación anatómica y funcional más estrecha después del aprendizaje. Para que las asambleas neuronales pudieran formarse, era necesario que los contactos sinápticos pudieran ser moldeados por la experiencia cotidiana, o en palabras técnicas, más plásticos (Figura 2).

Hacia inicios de la década de los 70, Timothy Bliss y Terje Lomo realizaron experimentos similares para comprobar experimentalmente el modelo teórico propuesto por Donald Hebb, el cual también ayudaría a explicar los mecanismos del aprendizaje y la memoria. Inicialmente, Timothy Bliss trataba de concluir sus estudios para obtener su grado. Bliss presumía que sus observaciones eran el “ejemplo de un cambio plástico en una cadena neuronal que se expresa como un aumento duradero de la eficacia sináptica”.

Con sus observaciones, Bliss logró graduarse como doctor en la universidad de Oslo, deteniendo el curso de sus investigaciones en ese punto. No obstante, Terje Lomo, un fisiólogo de origen británico formado en la universidad de McGill, tenía un genuino interés por conocer los últimos descubrimientos sobre los mecanismos cerebrales del aprendizaje y la memoria. Lomo contactó a Per Andersen, quien, por fortuna, le sugirió que debía comunicarse directamente con su estudiante Timothy Bliss, ya que “tendría algo que le interesaría”. Después de una larga charla, Bliss y Lomo continuaron profundizando en sus hallazgos previos y comenzaron a utilizar conejos como modelos experimentales de laboratorio. Después de varios intentos lograron extraer una parte de la corteza cerebral para poder acceder al hipocampo, un área cerebral importante para el aprendizaje y la formación de la memoria. Retirando parte de la corteza cerebral, Bliss y Lomo introdujeron un electrodo de estimulación en una región del hipocampo mientras registraban simultáneamente la respuesta eléctrica en una región adyacente. Bliss y Lomo estimularon con pulsos eléctricos de manera repetida, observando que la magnitud de la respuesta eléctrica, además de ser más grande que la registrada antes de la estimulación a alta frecuencia, se mantenía por



**Figura 3.** Los experimentos de Olds y Milner permitieron encontrar los sustratos neuronales de la recompensa y el placer. A la izquierda se muestra una fotografía con rayos X del sitio donde se implantó el electrodo de estimulación. Derecha, muestra un animal experimental utilizado por Olds y Milner en un paradigma conductual.

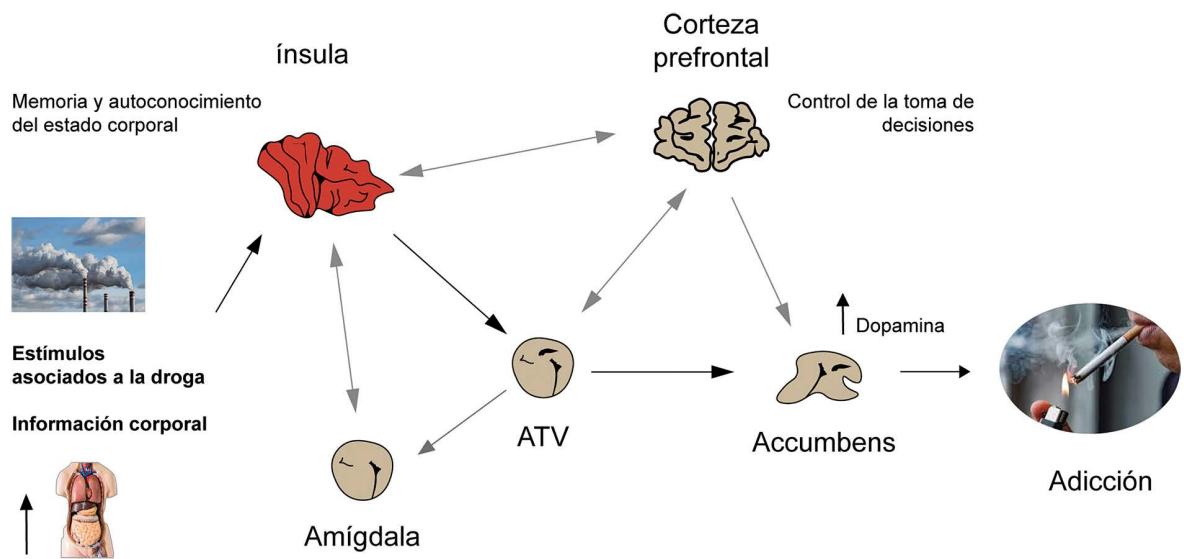
horas e incluso días. A este fenómeno, Bliss y Lomo lo denominaron potenciación a largo plazo, para hacer referencia al incremento en la eficiencia con la que se comunican las neuronas que forman un circuito dentro del hipocampo. El trabajo de Bliss y Lomo, además de corroborar la teoría Hebbiana, sentó las bases experimentales de la plasticidad que no solo ocurre en el hipocampo, sino que años después se demostró que también ocurre en muchos otros circuitos cerebrales durante el aprendizaje y la formación de la memoria.

#### UN HITO EN EL SENDERO: EL CIRCUITO DE LA RECOMPENSA

Los modelos experimentales que se utilizan en los laboratorios de neurociencia nos han permitido no solo entender los mecanismos básicos del aprendizaje y la memoria, sino que también son relevantes para la comprensión de los trastornos y las enfermedades mentales. Un ejemplo de ello fueron los experimentos realizados por Olds y Milner, quienes, de manera un poco accidental, encontraron lo que más tarde se definiría como parte del circuito de la recompensa en el cerebro. James Olds, un joven investigador situado en el instituto de neurología en Montreal, comenzó a trabajar con Donald Hebb a principios de la década de los años 50. Olds pensaba que la motivación es uno de los factores que nos

permiten aprender nuevas tareas con mayor facilidad, por lo que se interesó en descubrir los fundamentos neurobiológicos del aprendizaje motivado. James Olds, por su parte, sabía que las neuronas pueden comunicarse mediante pulsos pequeños de actividad eléctrica, mejor conocidos como potenciales de acción. Así, Olds trató de simular este fenómeno de manera artificial implantando electrodos fijos en áreas particulares del cerebro de roedores de laboratorio. Después de su recuperación, Olds registraba los efectos en su comportamiento mientras recibían pulsos de corriente eléctrica.

Peter Milner, quien llevaba tiempo trabajando con Hebb, realizaba experimentos similares y buscaba interrumpir el aprendizaje en las ratas mediante la estimulación eléctrica. De manera accidental, Milner colocó el electrodo de estimulación en una zona diferente a la planeada y, para su sorpresa, las ratas mostraron un comportamiento repetitivo donde buscaban obtener más estimulación eléctrica. Olds, al tener conocimiento sobre sus hallazgos, contactó a Milner para realizar una serie de experimentos más sistemáticos donde colocaron electrodos de estimulación en diferentes áreas del cerebro. En sus experimentos, las ratas tenían acceso a una palanca que podían presionar si la estimulación eléctrica les resultaba en un efecto positivo. Perplejos, observaron que las ratas aprendían rápidamente a presionar la palanca y podían autoestimularse eléctricamente de manera casi desproporcionada (Figura 3).



**Figura 4.** Muestra los núcleos centrales del circuito de la recompensa. La información del ambiente asociada al consumo de drogas y los estados corporales también relacionados pueden aumentar la actividad de la insula. Cuando eso pasa, el individuo puede percibir su estado corporal y desencadenar la búsqueda de la droga mediante su comunicación con otras áreas del circuito de la recompensa, motivando su búsqueda y su consumo.

Olds y Milner interpretaron esas observaciones como estados de placer o recompensa que la estimulación eléctrica les generaba a las ratas. Algunas de ellas presionaron más de 2,000 veces la palanca en intervalos relativamente cortos, dejando incluso de comer o beber. Olds y Milner acababan de descubrir parte de lo que tiempo después se denominó el circuito de la recompensa. Hoy sabemos que esta red está conformada por diversas áreas cerebrales, como el área tegmental ventral (ATV), el núcleo accumbens (NAc), la corteza prefrontal, el hipocampo, la amigdala y, más adelante, la insula. Todas estas áreas, al estar fuertemente interconectadas, nos permiten controlar la motivación para realizar una acción, modular la ingestión de estímulos gratificantes o tomar decisiones (Figura 4).

Algunos de los núcleos cerebrales más importantes del circuito de la recompensa, como el ATV y el NAc, pueden activarse de manera simultánea durante la exposición a estímulos gratificantes, generando así una experiencia placentera en el organismo. La comida, el agua o un encuentro sexual, son recompensas naturales que activan moderadamente este circuito a través de la liberación de ciertos neurotransmisores como la dopamina. Así, la liberación controlada de dopamina puede reforzar nuestra conducta, es decir, repetir la acción que nos

permitirá obtener una respuesta con mejor éxito. En este sentido, el correcto funcionamiento de este circuito nos ha conferido a los animales la capacidad de discriminar los estímulos gratificantes de aquellos que no lo son, garantizando nuestra supervivencia. Sin embargo, también existen estímulos placenteros como las sustancias de abuso, los videojuegos o las apuestas, que activan de manera exacerbada este circuito, generando cambios celulares que repercutirán en su funcionamiento. Estas modificaciones se pueden ver reflejadas en conductas mal adaptativas como las adicciones, donde existe un consumo compulsivo de estímulos, como las drogas de abuso, con el objetivo de experimentar una sensación de placer a pesar de los efectos negativos en el organismo. Así, al igual que las ratas de Olds y Milner, las cuales dejaban de comer o beber con la finalidad de obtener más recompensa, los individuos pueden seguir consumiendo sustancias de abuso, como el alcohol o el cigarro, a pesar de las consecuencias adversas.

Actualmente, la neurociencia nos ha enseñado que las neuronas del ATV son uno de los blancos principales de estas sustancias. Al poco tiempo de soltar una bocanada de humo, por ejemplo, la

nicotina presente en el cigarrillo es absorbida rápidamente por los alvéolos pulmonares. Al estar encargados del transporte de oxígeno y estar altamente vascularizados, el transporte de la nicotina hacia nuestro cerebro será facilitado en cuestión de segundos. Las propiedades químicas de la nicotina le permiten atravesar la barrera hematoencefálica, aquel límite celular que divide al sistema nervioso central –la médula espinal y el cerebro– del resto del cuerpo. Cuando las moléculas de nicotina atraviesan la barrera hematoencefálica y llegan al cerebro, se unen a receptores nicotínicos ubicados en la superficie de las neuronas del ATV. Esta interacción puede estimular la liberación de dopamina en diversas áreas del cerebro, incluyendo el NAc, provocando una sensación subjetiva de placer en el individuo. Con el tiempo, los receptores de la dopamina que se expresan también en la superficie de las neuronas del NAc serán menos sensibles a los niveles de dopamina inicialmente liberados. Cuando estos receptores se desensibilizan, el individuo tendrá que consumir una mayor dosis de la droga para experimentar el mismo estado de placer generado al inicio. Eventualmente, muchas áreas y circuitos cerebrales también se modificarán de manera prácticamente irreversible. Estos cambios traerán como consecuencia la pérdida en el control por su consumo y una mayor sensibilidad ante los estímulos que están asociados a la droga. De hecho, estudios en humanos han mostrado que una de las principales áreas cerebrales que se afectan por el consumo recurrente de drogas es la corteza prefrontal medial (CPM). La actividad de la CPM nos permite regular diversas funciones cognitivas como la toma de decisiones, la memoria para ejecutar una tarea en particular, así como la atención. Cuando se consumen drogas de abuso repetidamente, la forma en la que las neuronas del ATV liberan dopamina sobre las neuronas de la CPM, y cómo estas la reciben, puede alterar su sensibilidad. Estos cambios en el funcionamiento de la CPM se verán reflejados en conductas impulsivas características de una adicción. Además, el

hecho de que la CPM también esté interconectada con núcleos importantes para el procesamiento emocional, como la amígdala o el NAc, puede propiciar episodios de ansiedad y depresión durante los cuadros de abstinencia, los cuales solo podrán suprimirse si se consume nuevamente la droga. Así, considerando que el consumo repetido de sustancias de abuso puede modificar irremediablemente el cerebro, sigue siendo un reto el desarrollo y la optimización de los tratamientos para el control de las adicciones.

#### **COMO UN HURACÁN EN LA ÍNSULA**

El paciente B había fumado aquella noche un cigarrillo sin saber que ese sería el último. B comenzó a fumar desde la adolescencia y, hacia la edad de 30 años, consumía poco más de 30 cigarrillos al día, todos los días. A consecuencia de su adicción, B sufrió un evento vascular cerebral cercano a los 38 años, lo cual habría marcado un antes y un después en su consumo de tabaco. B entró a urgencias durante la madrugada. Los médicos lograron contener el daño y aminorar la lesión lo más posible. Cuando B se encontraba estable, los médicos le realizaron una encuesta de rutina para evaluar sus signos cognitivos. Para su sorpresa, cuando a B le preguntaron si tenía deseos por fumar, B respondió que “había olvidado que fumaba”. Como tal, B no había olvidado el acto de fumar, sino que los médicos, al pedirle que les explicara con mayor detalle, B respondió que “su cuerpo había olvidado el impulso de fumar”. Durante su estancia en el hospital, le parecía repulsivo cualquier olor relacionado con el humo de tabaco. Su compañero de habitación solía salir a fumarse un cigarrillo por las mañanas sin despertar el más mínimo deseo en B por consumir uno solo. Incluso, B solicitó que lo cambiaron de habitación pues el humo de tabaco ahora le parecía repulsivo. Con esta información en mano, los médicos realizaron un examen anatómico más profundo para determinar qué áreas cerebrales se habían afectado a causa del evento vascular. Al finalizar el análisis, los médicos observaron que B tenía lesionada una área cerebral conocida como la ínsula.

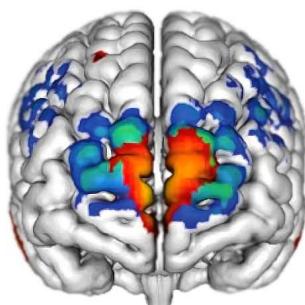
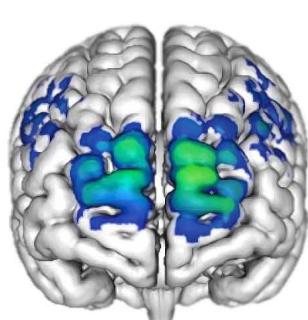
Uno de los primeros estudios que documentó casos de personas con daños cerebrales que comprometieron la función de la ínsula, reportó que los pacientes perdían el sentido del gusto. Lo interesante fue que, si sufrían daño en el hemisferio derecho, la pérdida de la capacidad gustativa solo se manifestaba en el lado izquierdo de la lengua y viceversa. Estos hallazgos se replicaron en modelos de laboratorio con roedores durante la segunda mitad del siglo XX, de manera que se obtuvieron resultados similares a las observaciones en humanos. No obstante, la evidencia acumulada en las últimas décadas ha mostrado que la actividad de la ínsula también está vinculada con el almacenamiento de experiencias gratificantes, así como en el procesamiento de las sensaciones corporales que van más allá del sentido del gusto.

Posterior al caso de B, numerosos grupos de investigación comenzaron a explorar más a detalle la función de la ínsula para comprender por qué su actividad es necesaria para el mantenimiento de una adicción. Es decir, ¿la ínsula es el lugar donde se origina el deseo por la droga? ¿Sería que B había olvidado que el cigarro le generaba cierto placer?, ¿o simplemente la capacidad para categorizar algo placentero o repulsivo se afectó por la lesión en la ínsula? La investigación experimental ha tratado de abordar estas preguntas, por lo cual se han desarrollado modelos conductuales que nos han permitido simular una adicción en los laboratorios. En un estudio, investigadores de la Universidad de Toronto, Canadá, evaluaron los efectos del bloqueo temporal de la actividad de la ínsula cuando un grupo de ratas habían aprendido a presionar una palanca para obtener droga. Inicialmente, las ratas tuvieron acceso a una palanca que aprendieron a presionar para recibir comprimidos de comida sabor dulce, en lugar de recibir estimulación eléctrica como en los experimentos de Olds y Milner. Cuando los animales habían asociado que la presión de la palanca les otorgaba la recompensa, esta fue sustituida por dosis pequeñas de nicotina vía intravenosa mediante un catéter previamente implantado en las ratas. Los investigadores infundieron bloqueadores de la actividad neuronal directamente en la ínsula de las ratas, mientras que en un grupo control independiente solo

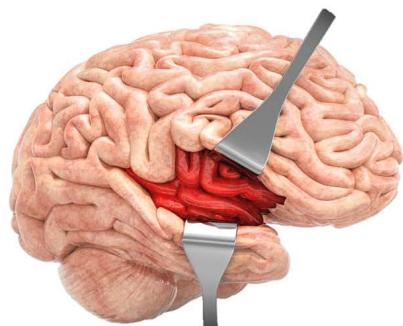
administraron solución fisiológica. Durante la prueba conductual, observaron que las ratas administradas con el bloqueador, y no así las ratas del grupo control, disminuyeron drásticamente las presiones por la palanca. Consistente a lo que ocurre en humanos, los animales con una actividad alterada de la ínsula disminuyeron la búsqueda y el consumo de la droga, concluyendo que la integridad de la ínsula es importante para mantener la motivación por la búsqueda de drogas.

Al igual que B, la interrupción súbita en el consumo de tabaco se ha observado en muchos pacientes con lesiones en la ínsula, abriendo nuevos enfoques para el tratamiento de las adicciones dirigidos a intervenir su actividad. No obstante, para el desarrollo y la optimización de estos tratamientos es necesario conocer con mayor detalle la conectividad anatómica y la función de cada uno de los circuitos que conectan a la ínsula con las demás áreas del cerebro. Esto ha sido posible gracias al desarrollo de técnicas avanzadas como la optogenética. Durante las dos últimas décadas, diversas áreas como la biología molecular y la genómica nos han permitido modificar genéticamente las neuronas con el objetivo de activar o inhibir un grupo de ellas con una alta resolución temporal mediante pulsos de luz. Así, numerosos grupos de investigación comenzaron a esclarecer la conectividad anatómica entre la ínsula y las demás áreas del cerebro. Estos estudios han demostrado que la corteza insular está altamente interconectada con áreas del circuito de la recompensa, las mismas que fueron observadas por Olds y Milner. De hecho, un estudio realizado por investigadores del Instituto de Fisiología Celular de la UNAM, en México, mostró que la inhibición del circuito entre la ínsula y el ATV en roedores puede bloquear el reconocimiento de un contexto asociado a los efectos gratificantes de una droga de abuso. Mientras que un trabajo realizado en el Instituto Nacional de Drogas de Abuso, en Baltimore, Estados Unidos, observó que bloquear la actividad del circuito neuronal entre la ínsula y la amígdala, interrumpe la recaída por la droga en un modelo experimental de laboratorio. En

## Estimulación magnética transcraneal



## Corteza insular



**Figura 5.** Muestra las áreas cerebrales que son estimuladas mediante EMT a la izquierda. Se observa al centro el área de la corteza prefrontal que es estimulada en los ensayos de EMT y, lateralmente, la actividad de la insula. Imagen modificada de Zangen (2021).

este sentido, la teoría del procesamiento interoceptivo propone que las sensaciones corporales que se generan durante el consumo de una droga pueden representarse en la corteza insular mediante patrones específicos de actividad. De manera simultánea, también las señales exteroceptivas, es decir, la información del contexto presente en el momento en que se ingieren drogas, también genera patrones únicos de actividad en la insula. Esta convergencia de la información, según la teoría, podría dar lugar a que un estímulo externo previamente asociado a los efectos de la droga pueda ser suficiente para evocar el deseo de experimentar nuevamente las sensaciones corporales gratificantes que inducen las drogas de abuso. Por ello, modular la actividad de los diferentes circuitos que se originan en las neuronas de la insula podría disminuir tanto la magnitud de las sensaciones placenteras que se experimentan durante el consumo de drogas –por ejemplo, bloqueando el circuito insular-ATV–, como la intensidad de los estados negativos que promueven la recaída –mediante la inhibición del circuito insular-amígdala–. En este contexto, comprender con mayor precisión cómo la actividad de la insula interactúa con diferentes áreas cerebrales mediante diferentes circuitos, podría ofrecer nuevas perspectivas terapéuticas para el control de los trastornos generados por el consumo de drogas desde un enfoque neurobiológico.

Gracias a los avances conceptuales y tecnológicos del siglo XIX y XX, ahora podemos estimular

algunas áreas cerebrales en humanos para controlar ciertos trastornos neuronales, como las adicciones, utilizando técnicas no invasivas. Una de ellas es la estimulación magnética transcraneal repetitiva (EMT), la cual utiliza campos magnéticos para activar zonas específicas de manera controlada. Dependiendo de la frecuencia con la que se aplique un campo magnético, el efecto sobre un área puede incrementar o disminuir su actividad. Así, investigadores en la Universidad de Israel han desarrollado un tratamiento utilizando EMT, que consistió en estimular repetidamente la corteza prefrontal y la insula (Figura 5).

Durante cada sesión, a los participantes les mostraban imágenes asociadas al consumo de tabaco con el objetivo de inducir la actividad cerebral que provoca el deseo. De esta manera, “cuando un circuito está activo, es más probable que cambie” –comenta Zangen, responsable del estudio. Al ser más vulnerable, es posible que la información almacenada en un código neuronal se altere, lo cual se busca pueda resultar en una interrupción en la búsqueda de la droga. Valiéndose de esta propiedad, los investigadores aplicaron pulsos a alta frecuencia diariamente durante 30 minutos. Al cabo de veintiún días, el proceso fue repetido una vez por cada periodo de tres semanas. Tras mes y medio, se observó en los pacientes una reducción significativa en el deseo y la motivación por fumar. Aunque los resultados de este primer ensayo aún no son duraderos como se desea, se observaron interrupciones alentadoras en el consumo de tabaco en muchos pacientes sin mostrar lesiones en la corteza prefrontal ni la insula.

Así como cesa una tormenta, el deseo por el tabaco se habría desvanecido aquella noche del cuerpo de B, superando su adicción de manera involuntaria. Ahora, el desarrollo de la ciencia básica y la tecnología convergen para generar terapias no invasivas mediante la alteración controlada de la actividad cerebral de la ínsula y, por lo tanto, de toda la red de la recompensa con la que se comunica.

## CONCLUSIÓN

Los descubrimientos del siglo XX han mostrado que el cerebro no es un órgano estático, sino que se encuentra en constante cambio. En tal sentido, la experiencia es uno de los factores principales que lo pueden modificar. Gracias a la capacidad plástica de nuestro cerebro es que podemos tomar decisiones o evocar la información necesaria que nos guía en el entorno. Sin embargo, otros factores, como el consumo frecuente de sustancias de abuso, puede generar cambios en su estructura que se reflejan en conductas aberrantes. Por ello, comprender que una adicción es un trastorno neurológico que resulta de estas alteraciones, y no solo la pérdida de la voluntad, puede ayudar a eliminar los estigmas y la marginación social hacia quienes lo padecen. En este sentido, las intervenciones mediante técnicas no invasivas de EMT dirigidas a la ínsula representan un nuevo blanco terapéutico prometedor en la clínica, así como una esperanza para quienes sufren de alguna adicción. El reto actual es combinar diferentes disciplinas para estandarizar los ensayos y poder generar terapias personalizadas. Finalmente, será importante tomar decisiones basadas en la evidencia experimental y recurrir a procedimientos clínicos que tengan una base científica sólida. Esto ayudará a que las personas que padecen una adicción se puedan recuperar y reintegrarse a la sociedad sin comprometer su propia integridad.

## AGRADECIMIENTOS

Una expresión de gratitud al doctor Federico Bermúdez-Rattoni por sus comentarios sobre el manuscrito. Este trabajo fue financiado por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación

(SECIHTI) con las becas FOINS 474, CF-2023-I-189, y DGAPA-PAPIIT-UNAM con la beca IN 213123 a Federico Bermúdez-Rattoni y CF-2023-G-518. E.H.-O. es estudiante de doctorado del Programa de Doctorado en Ciencias Bioquímicas, UNAM, y recibió la beca 810635 de la SECIHTI, México.

## R E F E R E N C I A S

- Adler A (1935). Zur Topik der corticalen Geschmackssphäre. *Z. f. d. g. Neur. u. Psych.* 152:25–33. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02865686>.
- Bliss TV and Lomo T (1973). Long-lasting potentiation of synaptic transmission in the dentate area of the anaesthetized rabbit following stimulation of the perforant path. *J Physiol.* 232(2):331-56. DOI: <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1973.sp010273>.
- Hernández-Ortiz E, Luis-Islas J, Tecuapetla F et al. (2023). Top-down circuitry from the anterior insular cortex to VTA dopamine neurons modulates reward-related memory. *Cell Reports* 42:113365. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.celrep.2023.113365>.
- López-Muñoz F, Boya J and Alamo C (2006). Neuron theory, the cornerstone of neuroscience, on the centenary of the Nobel Prize award to Santiago Ramón y Cajal. *Brain Res Bull.* Oct 16;70(4-6):391-405. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2006.07.010>.
- Nicoll JA (2017). A Brief History of Long-Term Potentiation. *Neuron* 93:281–290. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2016.12.015>.
- Naqvi NH, Rudrauf D, Damasio H and Bechara A (2007). Damage to the insula disrupts addiction to cigarette smoking. *Science* 315:531-534. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1135926>.
- Naqvi NH and Bechara A (2010). The insula and drug addiction: an interoceptive view of pleasure, urges, and decision-making. *Brain Struct Funct.* 214(5-6):435-50. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00429-010-0268-7>.
- Venniro M, Caprioli D, Zhang M et al. (2017). The Anterior Insular Cortex→Central Amygdala Glutamatergic Pathway Is Critical to Relapse after Contingency Management. *Neuron* 96:414-427.e8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2017.09.024>.
- Volkow ND, Michaelides M and Baler R. (2019). The Neuroscience of Drug Reward and Addiction. *Physiol Rev.* 1;99(4):2115-2140. DOI: <https://doi.org/10.1152/physrev.00014.2018>.
- Zangen A, Moshe H, Martinez D et al. (2021). Repetitive transcranial magnetic stimulation for smoking cessation: a pivotal multicenter double-blind randomized controlled trial. *World Psychiatry* 20:397-404. DOI: <https://doi.org/10.1002/wps.20905>.

**Eduardo Hernández-Ortiz**  
**Instituto de Fisiología Celular**  
**División de Neurociencias**  
**Universidad Nacional Autónoma de México**  
[jorgeeduardo@gmail.com](mailto:jorgeeduardo@gmail.com)

© Miguel Ángel Andrade. De la serie Xochipila.



# El aparecer del cuerpo propio: ¿cómo es que nos apropiamos de cierta habilidad?

**Rubén Sánchez Muñoz**

El tema de este texto es el de la constitución del cuerpo propio, es decir, el cuerpo vivo personal, mi cuerpo (y el cuerpo de cada uno de nosotros de manera individual). Sin embargo, lo tomaremos como punto de partida para abordar la pregunta: ¿cómo es que nos apropiamos de cierta habilidad y qué sentido tiene esta apropiación? En la base se halla lo siguiente:

1. Nuestro modo de ser en el mundo es corporal (aunque ello no signifique que solo habitamos corporalmente en el mundo, sin la intervención de otros elementos constitutivos de nuestro ser personal); y
2. A lo largo del tiempo, en el despliegue de nuestra existencia, vamos adquiriendo ciertas habilidades que nos abren un universo de posibilidades; por ejemplo, la de crear e introducir cosas nuevas en el mundo y formar parte de la cultura, pero que tienen un impacto inmediato en nuestra biografía. Tienen un sentido existencial.

No se pueden pasar por alto los campos de aplicación del método fenomenológico a casos como el lugar del cuerpo ante la enfermedad y la discapacidad (Escribano y Trilles-Calvo, 2018), en las neurociencias o el transhumanismo (al tratar el problema de la vejez, la prolongación de la vida, la lucha contra la muerte y la aplicación de la tecnología para el tratamiento de la pérdida de capacidades



© Miguel Ángel Andrade. De la serie *Ofrenda Izta Andrade*.

y el biomejoramiento humano, etc.) (Diéguez, 2021). Pero, por muy interesantes que resultan estos temas, nuestro trabajo no intenta discutir estas cuestiones. A lo largo de este ensayo descriptivo, nos centraremos fundamentalmente en responder esta pregunta que parece sencilla, pero que en realidad esconde una multiplicidad de problemas. La finalidad será esclarecer algunos de ellos. Se trata de reflexionar y poner en cuestión aspectos que normalmente no cuestionaríamos. A este momento en el que algo aparentemente obvio se torna cuestionable, lo llamaremos filosofía (aunque el término tenga mayor amplitud y profundidad). Por ejemplo, a pesar de que vivimos y habitamos corporalmente en el mundo, solemos pensar poco en lo que significa esta corporalidad vivida. A lo largo de este trabajo el concepto de constitución juega un doble papel: por un lado, se refiere a la manifestación del sentido de algo y, por otro, tiene un sentido biográfico. La razón de esto último es que la formación de las habitualidades o habilidades también se manifiesta como sentido vivido para el sujeto que se apropió de dicha capacidad. Esa apropiación modifica su modo de ser en el mundo, hace que su propia vida aparezca de

otro modo en cada momento. La historia de esta subjetividad, o sea la narración de su vida, daría cuenta de ese proceso. ¿Hasta dónde el desarrollo de la persona depende de cómo puede ella misma disponer de su cuerpo?

En efecto, parece tan obvio que nuestro modo de ser es corpóreo que olvidamos preguntarnos por su sentido y su presencia. En efecto, como decía Joaquín Xirau, este cuerpo vivido es para nosotros “presencia inseparable, cobijo u obstáculo, aliciente y enigma” (2010, p. 87). Estamos más bien orientados a pensar nuestra corporalidad en relación con la experiencia que tenemos del mundo; por ejemplo, lo que nos llega a través de los sentidos.

Sin duda, hay una base sensible de nuestra experiencia en la que nuestro modo de ser corporal está referido a las cosas que nos rodean. Pero también podemos tener experiencia de nuestro ser corpóreo; se nos pasa que toda experiencia posible está referida y fundada en esta corporalidad. Dice Joaquín Xirau (p. 88):

Yo soy mi cuerpo. En algún sentido, mi cuerpo es mi alma encarnada. ¿Qué sería yo sin él? En él y por él deseo y anhelo. Amo y detesto, palpito de gloria y tiemblo de miedo. El corazón se me hace pequeño



© Miguel Ángel Andrade. De la serie *Ofrenda Izta Andrade*.

o se me ensancha. Sin el cuerpo, no me sería posible reír ni llorar. ¿Y qué sería yo sin risa ni llanto? Es la fuente de la vida, del hambre y del amor.

Así, el método que seguiremos es el fenomenológico, lo que significa que llevaremos a cabo un trabajo descriptivo que nos permita comprender el modo o los modos en que las cosas aparecen a nuestro alrededor. Lo que ocurre es que nuestro cuerpo también aparece; por tanto, el cuerpo propio también es fenómeno (aparecer). Pero intentemos ver esto más de cerca y con mayor detalle.

#### LA ACTITUD PERSONALISTA

Husserl expuso a lo largo de su obra que no se puede hacer filosofía si de algún modo no abandonamos cierto modo de vivir al que estamos acostumbrados, y en el que suele transitar nuestra vida diaria: lo llamó “actitud natural”. Para no confundirla con una actitud naturalista –que consiste en una naturalización del mundo y de las cosas, pasando por la defensa de una ontología material impersonal en la que todo lo que hay y existe es material (y así lo describe Miguel García-Baró, 1999–, lo que encontramos en Husserl es el término: “actitud personalista” (2005).

En efecto, en las mismas coordenadas de Husserl respecto a esta crítica radical de la actitud naturalista, Maurice Merleau-Ponty escribió en su obra *El ojo y el espíritu*:

La ciencia manipula las cosas y renuncia a habitarlas. Construye modelos internos de ellas y, operando sobre esos índices o variables las transformaciones que permite su definición, se confronta solo de lejos con el mundo actual. La ciencia es, siempre lo ha sido, ese pensamiento admirablemente activo, ingenioso, desenvuelto, esa resolución previa de tratar todo como objeto en general, esto es, a la vez como si no fuera nada para nosotros y se encontrara no obstante predestinado a nuestros artificios. (Merleau-Ponty, 2013, p. 17.)

El mundo de la ciencia, como lo presentan los científicos, es un mundo impersonal, con el sentido de un mundo material en el que todo es tratado “como objeto en general”. En cambio, esta actitud personalista vendría a ser una toma de postura en la cual el mundo aparece con sentido siempre, y en cada caso, para una persona. El mundo como fuente de sentido vendría a ser lo propio de un mundo espiritual; este es, en efecto, el mundo propiamente humano, y por ello llega a tener el sentido de la cultura.

#### EL APARECER DEL CUERPO PROPIO

En el campo de la fenomenología, las investigaciones sobre la corporalidad ocupan un lugar importante. Edmund Husserl desarrolló importantes aportaciones a este tema en un libro que ya tenía revisado hacia 1918, pero que no se publicó sino póstumamente hasta 1952: *Ideas II*. Dentro de estas descripciones, encontramos las bases para el desarrollo de este trabajo. Una de ellas es la que se refiere a la constitución del cuerpo vivo. Es decir, dentro del horizonte de cosas, objetos o realidades que se van develando y apareciendo, se encuentra el cuerpo que vivimos y que somos. La constitución se refiere, fundamentalmente, al “proceso que permite

la manifestación y significación de las cosas" (Escudero, 2011, p. 158). Y así, el cuerpo cobra sentido en su manifestarse, y como una de las formas de manifestarse es a través de lo que hace, este hacer llega a ser habitual; las habitualidades así entendidas también aparecen y están sujetas a un proceso de constitución.

Algunas preguntas problemáticas son: ¿cómo nos apropiamos de ciertas habilidades?, ¿cómo es que, por ejemplo, andar en bicicleta pasa de ser algo desconocido para convertirse en algo que hacemos nuestro?, ¿en qué momento adquirimos habilidades tan importantes como leer o escribir? No es tan sencillo como decir simplemente que hay que ir a la escuela, etcétera.

En el momento mismo de escribir estas líneas estoy usando un teclado diferente al que uso habitualmente. En esta experiencia me tengo dado a mí mismo (y lo puedo extender a toda vivencia). Descubro varias dificultades para escribir porque la distribución de las teclas, así como el tamaño del teclado y su modo de estar en contacto con los dedos, es diferente. Es un problema muy sencillo, pero exhibe el sentido de una experiencia que no es solo corporal. Me interesa en este momento que, con el teclado (y en general con esta computadora), tengo dificultades. Lo curioso es que estas mismas dificultades son menores conforme avanza. Alguien podría decir que no se trata de un problema o de una dificultad mayor, sino del desconocimiento del teclado y de ciertas habilidades para escribir. Supongamos que tiene razón. Pero esta dificultad inicial la puedo llevar a cualquier ámbito y actividad de la vida en la que uso un artefacto por primera vez o inicio una actividad nueva.

Otro ejemplo sería este: estoy habituado a cocinar en la cocina de mi casa. La conozco, tengo una relación con sus cosas: sé dónde están o dónde deberían estar. Y cuando no aparecen donde espero y aparecen en otro sitio o no aparecen, cambia mi modo de hacer las cosas. Eso me dispone a actuar de otro modo: tardo más tiempo, me irrito o renuncio a hacer lo que pensaba. La dificultad es mayor si



© Miguel Ángel Andrade. De la serie *Ofrenda Izta Andrade*.

tengo que cocinar en casa de unos amigos, porque allí también hay una cocina, pero no es mi cocina! ¡No la conozco! Ello no quiere decir que ignoro del todo lo que hay en ella. Pues reconozco las cosas cuando las veo, sé para qué sirven y cómo podría apoyarme en ellas para realizar mi objetivo. Y, sin embargo, no sé qué hacer, no sé por dónde empezar. Ajustarme a ella puede llevar su tiempo.

Así pues, lo que noto a través de estos ejemplos es que me tengo que poner en movimiento para realizar las tareas. Este cuerpo vivo que soy, con todas las dificultades y aclaraciones y matices que tendrían que hacerse para esclarecer el sentido que ello tiene, se mueve. Lo muevo = me muevo. Este movimiento no es algo externo o ajeno, que ocurre en otro sitio. Soy yo en movimiento. Mi cuerpo kinestésico = órgano de movimiento. Que mi cuerpo vivo sea un cuerpo en movimiento, constituido por órganos de sensación (como los sentidos y sus campos de sensaciones), no significa que tenga o haya tenido para mí siempre el mismo sentido. He tenido que apropiarme de ello. El teclado está ahí, al igual que la cocina (como una unidad de



© Miguel Ángel Andrade. De la serie *Ofrenda Izta Andrade*.

sentido compuesta de sus partes), pero debo entrar en una relación con ellos para poder escribir o cocinar. Y mi cuerpo está también, pero no ahí o allá, sino aquí. No puede estar en otra parte. Es el “centro de orientación” o “punto cero” de las coordenadas espaciales. Husserl lo llama “aquí central último” (2005, p. 198).

Pero el dominio y apropiación de mi cuerpo vivo es algo que también tiene que ser constituido. La dificultad que puedo experimentar en la manipulación y uso de cualquier objeto o al realizar cualquier actividad es la dificultad con la que inicialmente vivo mi corporalidad, aunque de hecho no lo recuerde. Hay muchas cosas que sé, habilidades que domino, pero ocurrieron en un tiempo inmemorial (como mi propio nacimiento). Están marcadas en mí, son parte de mí, pero no sé bien cómo pasaron. Es decir, veo cómo pasa en otros y pienso que eso mismo pasó conmigo. Cuando otro tiene dificultades o yo mismo, me da la impresión de que mi cuerpo es un obstáculo. Opone resistencia. Por más que quiera correr velozmente, llega un momento en el que ya no puedo más. No hablo aquí del cuerpo

del atleta olímpico que tiene una vida profesional y domina esta habilidad, aunque no deje de ser esta resistencia verdad también para él.

Decir que somos sujetos de habitualidades es un modo de decir algo verdadero que se puede constatar en las cosas mismas. ¿Cómo nos apropiamos de la lengua materna? La lengua no estaba originalmente en nosotros, pero algo en nosotros que podemos llamar capacidad permite que la asimilemos y la hagamos nuestra. Por ello, decir que los seres humanos somos seres de capacidades es una descripción correcta, y pensarnos como sujetos que pueden y deben desarrollar capacidades, como propone Nussbaum (2012), es igualmente acertado.

Entonces, a lo largo de la vida voy constituyendo muchas cosas que llegan a formar parte de mi modo de ser y que, con el tiempo, me permiten desarrollar un estilo personal. Yo mismo conquisto para mí capacidades que se quedan marcadas como un sello en mí. Constituyen mi modo de ser, es decir, mi *ethos*

( $\eta\thetao\varsigma$ ) o carácter. Hablar, caminar, correr, escribir, nadar, andar en bicicleta, jugar fútbol, etc., son todas ellas habilidades adquiridas, que no son solo mías, ya que también los demás las hacen; pero yo las realizo a mi modo, las hago mías. Ello no significa que estén adquiridas de un modo adecuado. Podrían mejorarse. En resumen, estas habilidades: 1) Son adquiridas; 2) están sujetas a una mejora constante, y 3) no son solo mías.

Siempre puedo saber más de mi lengua, o aprender una nueva receta, o correr un poco más lejos y con una técnica adecuada, etcétera. En todo caso, son habilidades de las cuales no disponía antes y ahora sí. Pensarlo de otro modo también es acertado: hay habilidades de las que podría disponer y no dispongo. Nadar es importante aun en aquellos momentos en los que no estoy nadando. Es una habilidad de la que puedo disponer cuando se necesita o requiera. En todo ello, en un fondo que lo sostiene, nos hemos estado refiriendo a habilidades en las que está en juego el papel del cuerpo gracias a su capacidad de movimiento, pero sobre las cuales pueden dejarse venir en cascada una serie de reflexiones más amplias. Indiquemos solo algunas.

#### **FINALIDAD, SENTIDO CULTURAL E HISTORIA**

Las habilidades que hemos descrito tienen una finalidad: se hacen por una razón, por y para algo. Llevo la mano a la alacena para sacar un vaso y tomar agua porque tengo sed; me inscribo a un equipo de fútbol para correr detrás de un balón y anotar goles. Pero no solo requiero ponerme en movimiento corporal, tengo que querer hacerlo y disponerme a ello. Y por ello me experimento como sujeto de voluntad. La finalidad es comer, y por ello es que entro a la cocina y preparo comida. Necesito hacer ejercicio porque es bueno para la salud y me dispongo a correr, a escalar una montaña, a bailar o subir a la bici. ¿Para qué y cuál es el fin de algo? Ello dependerá de un contexto más amplio, de unas razones que nosotros mismos hemos definido o que otros, congéneres o predecesores, dejaron establecidas. Ello no quiere

decir, de ninguna manera, que yo mismo o los otros no puedan cambiar ese modo de ser o de hacer las cosas. Puedo siempre, con ayuda de la imaginación y la fantasía, y echando mano de la creatividad, hacer modificaciones e incluso puedo introducir cosas nuevas en el mundo. Está dentro de mis posibilidades.

Lo que considero que son mis habilidades, porque yo las constituyo al apropiarme de ellas (con esfuerzo, trabajo, disciplina, etc.), resulta que no son solo mías. Aparecen en un horizonte intersubjetivo. Voy a la escuela a aprender ciertas cosas, como leer y escribir. Pero leer y escribir pueden tener una multiplicidad de fines. Esos sentidos van apareciendo en la medida en que avanzo. Porque logro ciertas cosas, luego puedo aspirar a lograr otras, pero siempre en el seno de una cultura, en medio de otros sujetos que también lo aprenden y también lo hacen. Algunas de esas habilidades devienen en competencias de menor o mayor alcance. A ellas se puede uno dedicar de manera profesional. Algunas personas se dedican de modo profesional a los deportes y hacen de ello un estilo de vida e imponiendo a los otros ciertos modelos y prototipos.

¿Qué es lo que aparece cuando me dispongo a aprender algo? Me doy cuenta de que ocurren muchas cosas. Una de ellas es que me encuentro con ciertos artefactos que puedo conocer y manipular. Esos artefactos son creaciones humanas y por ello son artificiales = creados. Artificiales, pero útiles. Sirven, en principio, para resolver cosas (como preparar, colocar y manipular la comida, o escribir textos), para realizar algún deporte (como ciclismo) o, quizás también, para entretener y dejar pasar el tiempo (como la película que vemos en la pantalla). No son los únicos sentidos posibles y abundan los ejemplos.

Veo también que se trata de objetos, actividades y habilidades que se desarrollan en el seno de una cultura, es decir, en un mundo de la vida espiritual adaptado y creado para vivir humanamente. Es en la cultura donde la vida llega a ser humana, donde se pasa de una vida meramente biológica a una vida biográfica (Ortega, 2006b) en cultivo y cuidado de sí. Pero el cuerpo también tiene este sentido cultural. Porque pertenecemos a grupos y en ellos tenemos tradiciones, costumbres, lenguaje, instituciones,

valores, modos de ser y de aparecer ante los demás. Lo que hago, entonces, al apropiarme de esas habilidades es, en gran medida, ingresar en una cultura, en un espacio intersubjetivo: monto una bicicleta que otro inventó y que muchos otros fabrican, venden, distribuyen, etcétera. Cocino una receta que heredé de mi abuela y que forma parte de una tradición familiar (muchas personas ganan premios nacionales o internacionales en concursos gastronómicos, etc.). Mi mundo no es solo cultural e intersubjetivo, sino también histórico (véase Carr, 2017).

Aquí podríamos tomar como base y referencia una indicación de Alfred Schutz y Thomas Luckmann, a saber: “que un individuo nace en un mundo histórico social” y que, al ser de ese modo, “su situación biográfica está, desde el comienzo, delimitada por elementos sociales dados que encuentran expresiones específicas” (2009, p. 236). Si a esto se le quisiera objetar que esas condiciones, por ser históricas, no tienen por qué ser como son y pueden –y en algunos casos hasta deben– ser cambiadas, no vemos ningún problema en ello. Lo que pasará es que, al ser modificadas, tendrán que ser reemplazadas por otras, surgirán nuevas prácticas o estilos y, con el tiempo, eventualmente, podrían ser cuestionadas y sujetas al cambio también. Los individuos que entren en el mundo social de la vida establecido en ese lapso de tiempo adoptarán, de manera más o menos acrítica (por un momento, por lo menos), el *status quo* de su tiempo. En este sentido, también el mundo social llega a ser el que es a través de un proceso de constitución. ¿Quiénes lo constituyen? Los individuos que lo conforman y que llevan a cabo ciertas prácticas. La vida tiene un sentido performativo (Vargas, 2019), que deviene en el desarrollo de habilidades. Con ellas actuamos y nos constituimos, habitamos el mundo cultural, heredamos tradiciones y creamos nuevas formas de dar sentido. Por ello, “ni yo mismo comprendo todo lo que soy”, como dice san Agustín.

## CONCLUSIONES

En este proceso de constitución de mi corporalidad, ¿qué es lo que descubro?

1. Descubro que, en el proceso de asimilación de

una habilidad, mi subjetividad es constituida en el mismo proceso de constitución.

2. Que la experiencia que tengo de mi propia subjetividad se da a través de mi cuerpo y en relación con otras personas.
3. Que ese mundo en el que nos encontramos no es solo naturaleza, es también, y sobre todo, mundo cultural (es decir, un conjunto de creaciones humanas en las que habitamos).
4. Que tanto el mundo cultural como mi propia corporalidad son realidades históricas, esto es, se constituyen y llegan a ser como son a través de un proceso temporal que supone un antes y un después.

## R E F E R E N C I A S

- Carr D (2017). *Experiencia e historia. Perspectivas fenomenológicas sobre el mundo histórico*. Buenos Aires: Prometeo Libros.
- Diéguez A (2021). *Cuerpos inadecuados. El desafío transhumanista a la filosofía*. Barcelona: Herder.
- Escribano X y Trilles-Calvo KP (2019). El dolor de los otros y su expresión dramática: fenomenología y performance. *Isegoria* (60):147-167. DOI: <https://doi.org/10.3989/isegoria.2019.060.09>.
- Escudero JA (2011). Anexo: Notas aclaratorias. En Husserl E, *La idea de la fenomenología* (pp. 155-167). Barcelona: Herder.
- García-Baró M (1999). *Vida y mundo. La práctica de la fenomenología*. Madrid: Trotta.
- Husserl E (2005). *Ideas relativas a una fenomenología pura y una filosofía fenomenológica. Libro segundo: Investigaciones fenomenológicas sobre la constitución* (trad. A. Zirión). México: UNAM-FCE.
- Merleau-Ponty M (2013). *El ojo y el espíritu*. Madrid: Trotta.
- Nussbaum M (2012). *Crear capacidades. Propuesta para el desarrollo humano*. Barcelona: Paidós.
- Ortega y Gasset J (2006b). Pidiendo un Goethe desde dentro. En *Obras completas V* (pp. 120-142). Madrid: Taurus-Fundación Ortega y Gasset-Gregorio Marañón.
- Schutz A y Luckmann T (2011). *La construcción social de la realidad*. Buenos Aires: Amorrortu.
- Vargas G (2019). *Fenomenología y performance*. Bogotá: Aula de Humanidades.
- Xirau J (2010). Presencia del cuerpo. En VVAA, *Cuerpo vivido* (pp. 87-98). Madrid: Encuentro.

**Rubén Sánchez Muñoz**  
**Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla**  
**[ruben.sanchez.munoz@upaep.mx](mailto:ruben.sanchez.munoz@upaep.mx)**



© Miguel Ángel Andrade. De la serie Ofrenda Izta Andrade.

# Más allá de lo visible en el uso de animales para investigación biomédica

**Patricia Frías Álvarez**  
**Gustavo Ortiz Millán**

Hoy en día, gracias a los avances tecnocientíficos en el área biomédica y farmacológica, es posible realizar diagnósticos certeros de una forma más rápida, tratar exitosamente enfermedades tanto en humanos como en la medicina veterinaria, realizar procedimientos quirúrgicos complejos y tener terapias génicas. El uso de animales con fines de investigación biomédica ha sido decisivo en varios de estos avances médicos, como antibióticos, trasplantes, prótesis, uso de la insulina, vacunas y fármacos contra el cáncer, lo que ha contribuido de manera sustancial a mejorar la calidad de vida de las personas y, en algunos casos, de los animales. Sin embargo, detrás de estos beneficios, primordialmente para la salud humana, se encuentra el sometimiento de los animales a la experimentación. El uso de animales con fines de investigación biomédica o farmacéutica es considerado uno de los ámbitos de explotación animal más complejos debido a su enorme contribución en el área de la salud, no exento de polémica pública sobre su uso y la persistente inquietud por parte de varios investigadores del área biomédica y farmacéutica (Téllez-Ballesteros y Vanda-Cantón, 2020).

## **EXPERIMENTACIÓN QUE SE SIENTE**

Desde una perspectiva histórica, el uso de animales en experimentación biomédica y farmacológica se remonta a



© Miguel Ángel Andrade. De la serie *Ofrenda Izta Andrade*.

hace aproximadamente 87 años. En 1937, en Estados Unidos, la compañía farmacéutica S. E. Massengill desarrolló el “Elixir Sulfanilamida”, un antimicrobiano en presentación para vía oral, que contenía sulfanilamida (10 %), dietilenglicol (72 %), agua (16 %) y un pequeño porcentaje de saborizante. El dietilenglicol, usado como excipiente en el elixir, es altamente tóxico en humanos; sin embargo, los farmacéuticos responsables no eran conscientes de ello. La intoxicación causada por este fármaco provocó la muerte a más de un centenar de personas. Como resultado, en 1938, el Congreso estadounidense instauró la obligación de realizar pruebas de toxicología en

animales, antes de la comercialización de medicamentos para humanos. Posteriormente, en la Declaración de Helsinki –que es el documento más importante en materia de protección y regulación ética de la investigación en seres humanos– se estipula que la investigación en seres humanos puede y debe apoyarse en experimentos realizados en animales. Actualmente, la Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos (FDA por sus siglas en inglés) requiere que se realicen exámenes preclínicos para cualquier fármaco nuevo, antes de que se inicien los ensayos clínicos en humanos, con el fin de examinar la actividad farmacológica y toxicidad aguda en animales (Van Norman, 2019). Con respecto a México, el Reglamento de la Ley General de Salud en Materia de Investigación para la Salud estipula que la investigación que se realice en seres humanos se fundamentará en la experimentación previa en animales.

Diversas investigaciones en el área de las neurociencias han demostrado la sintiencia animal, entendida como la capacidad que posee un animal de sentir y experimentar estados afectivos positivos y negativos que van desde la alegría y el placer, hasta el miedo y el dolor (Browning y Veit, 2022). Por tal motivo, el uso de animales en procesos experimentales implica responsabilidades éticas que precisan considerar de manera integral, tanto su salud física como su bienestar emocional (Téllez-Ballesteros y Vanda-Cantón, 2020). La gran mayoría de los animales sometidos a los procesos de investigación terminan siendo sacrificados como parte de la rutina experimental. Con el fin de llevar a cabo los procedimientos experimentales es necesario el uso de células, tejidos, órganos o el cuerpo completo del animal, por lo que es necesario matarlo (Téllez-Ballesteros y Vanda-Cantón, 2020).

#### **DEL LABORATORIO A TUS MANOS**

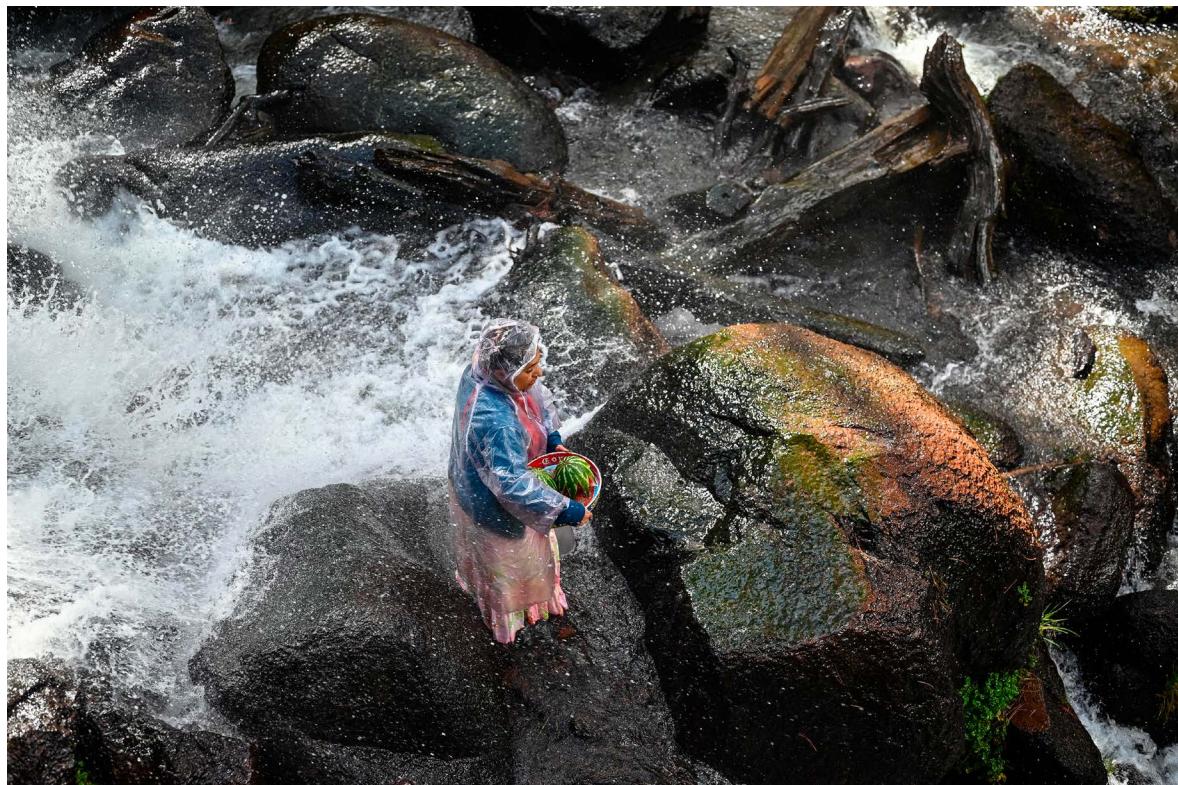
La investigación y desarrollo de un fármaco nuevo es un proceso largo y sumamente costoso. En una revisión sistematizada de literatura, Schlander y colaboradores (2021) encontraron que el tiempo de desarrollo de un nuevo medicamento varía según

el área terapéutica. Se estima que el periodo de investigación y desarrollo de un medicamento osciló entre 5.2 años en analgésicos, 9.7 años en neurofármacos y 11.5 años en oncología. Asimismo, el costo promedio de la investigación y el desarrollo de un medicamento es heterogéneo y varía según el área terapéutica, siendo los medicamentos contra el cáncer los más costosos. Se estima que, en los últimos seis años, la inversión previa al lanzamiento de un nuevo medicamento osciló entre 161 millones y 4.54 mil millones de dólares americanos. La investigación biomédica engloba a la investigación preclínica y clínica; estas últimas son fundamentales en el desarrollo de nuevos fármacos.

Con el fin de comprender un poco más cómo es que llega a nuestras manos un medicamento, describiremos a continuación, de manera breve y según lo planteado por Zurita-Cruz y sus colaboradores (2019), las fases de desarrollo para la obtención de un fármaco nuevo. Primeramente, se identifica y valida la sustancia que tiene todo el potencial para neutralizar la enfermedad. En esta fase se incluyen

ensayos tanto *in vitro* (órganos y tejidos aislados) como *in vivo* (con modelos animales). El tiempo promedio de duración en esta fase es de 2 a 5 años.

Posteriormente, se encuentra la fase preclínica; es en esta fase donde los resultados experimentales de la eficacia y tolerancia del nuevo tratamiento realizados en modelos animales sustentarán la posterior investigación del fármaco en humanos. El nuevo compuesto es ensayado extensivamente en laboratorio, tanto con modelos *in vitro* como *in vivo*. Los experimentos que son realizados en modelos animales examinan la toxicología, la seguridad del nuevo fármaco a dosis equivalentes para ser usadas en humanos, los mecanismos de acción del fármaco, posible relación con dosis y respuesta clínica, la absorción, distribución, metabolismo y excreción del fármaco, y sus posibles interacciones con otros medicamentos. La duración de esta fase es de 1 a 5 años. Más adelante, con los resultados de la fase preclínica se da inicio a los ensayos clínicos en humanos que constan de cuatro fases y pueden llevar un periodo de 7 años. La Fase I busca saber



© Miguel Ángel Andrade. De la serie Ofrenda Izta Andrade.

si el medicamento es seguro en personas sanas. La Fase II tiene como objetivo evaluar la eficacia del producto en pacientes. Mientras que la Fase III busca comparar si el fármaco nuevo es mejor o similar a los tratamientos ya existentes. Es en la Fase IV (también conocida como farmacovigilancia o de estudios poscomercialización) donde los datos obtenidos de las anteriores fases son remitidos a las autoridades sanitarias para su autorización y su regulación comercial. Se vigilan los efectos hasta el momento desconocidos (benéficos o adversos) del fármaco a largo plazo y en un número mayor de pacientes, así como su impacto en patologías excluidas previamente, interacciones con otros fármacos y diferentes formas de dosificación.

#### **LIMITACIONES EN LA EXPERIMENTACIÓN CON MODELOS ANIMALES**

Desde hace un tiempo existe un debate polémico acerca de los modelos animales usados en la investigación preclínica. Los modelos animales han sido fuertemente cuestionados y criticados por su capacidad para predecir en humanos la toxicidad (efectos nocivos de un medicamento), seguridad (detección, evaluación y prevención de efectos secundarios) y eficacia (capacidad de estabilizar, mejorar o reducir la enfermedad) de los nuevos fármacos. Los críticos cuestionan el uso de modelos animales debido a los numerosos fracasos reportados en la acción de los medicamentos nuevos. En este sentido, Keen (2019) refiere que aproximadamente el 88 % de los experimentos preclínicos realizados con modelos animales no son válidos; esto es, el nuevo fármaco es ineficiente clínicamente y/o es tóxico en humanos. En el transcurso se ha ocasionado la muerte sin sentido de miles de animales y pérdidas monetarias significativas.

Asimismo, Keen (2019) menciona que los nuevos compuestos fallan porque son ineficaces o tóxicos en humanos. Los nuevos compuestos pueden ser seguros en animales de laboratorio, pero ser tóxicos en los humanos o viceversa. El medicamento para la artritis Vioxx (rofecoxib) pasó la prueba de seguridad

en 6 diferentes modelos animales, entre los que se incluían a los monos verdes africanos. Sin embargo, tuvo que ser retirado del mercado por cuestiones de seguridad al aumentar el riesgo de enfermedades cardiovasculares y ocasionar la muerte de aproximadamente 60,000 personas. Por el contrario, algunos compuestos pueden ser tóxicos en animales y ser seguros en humanos. La aspirina fue patentada en 1900, época en la que aún no eran obligatorias las pruebas de seguridad en animales. Posteriormente, al ser evaluada, se encontró que la aspirina produce malformaciones embrionarias en gatos, perros, ratones, ratas, conejos y monos. Con los resultados obtenidos *a posteriori*, la aspirina posiblemente no sería aprobada para su comercialización hoy en día.

Solo uno de cada diez estudios realizados con animales da lugar al uso en pacientes, lo que ha llevado a los expertos a investigar las razones. Se concluyó que es el resultado de dos componentes principales que se encuentran estrechamente interrelacionados. El primero corresponde a las diferencias inherentes entre los seres humanos y animales (validez de modelos animales o la capacidad del animal de replicar la condición y los aspectos de una enfermedad humana), mientras que el segundo se relaciona con prácticas experimentales deficientes (estudios preclínicos mal diseñados, que derivan en ensayos clínicos fallidos) (Keen, 2019).

#### **¿QUÉ TANTO NOS PARECEMOS, MUCHO, POCO O NADA?**

Existe una contradicción moral que se utiliza para justificar el uso de animales en procedimientos de experimentación biomédica (Téllez-Ballesteros y Vanda-Cantón, 2020). Por un lado, se insiste en la similitud que existe entre animales y humanos para justificar su uso en experimentación; pero, al mismo tiempo, se ignoran sus intereses, como el que no resulten perjudicados y puedan vivir con bienestar, tratándolos como objetos de experimentación y material biológico desecharable (Téllez-Ballesteros y Vanda-Cantón, 2020).

Las enfermedades humanas son inducidas artificialmente a modelos animales, muchas de las cuales no se presentan naturalmente en ellos. A un



© Miguel Ángel Andrade. De la serie *Ofrenda Izta Andrade*.

animal sano se le puede generar una enfermedad humana a través de la administración de sustancias, por medio de intervenciones quirúrgicas y/o de la manipulación genética. Por ejemplo, como explica De Jesús-Monge (2015), para realizar estudios de cáncer en ratones comúnmente se utilizan tres modelos: inducción química, xenoinjertos (introducción de injertos desconocidos) y animales genéticamente diseñados. En el primero, los ratones son inducidos químicamente a sustancias carcinogénicas que pueden ser administradas vía intragástrica, intravenosa, subcutánea e intraperitoneal. En la inserción de células humanas tumorales de cáncer en ratones, primeramente se extraen células tumorales de un paciente humano; posteriormente se realiza una cirugía a un ratón inmunodeprimido con el fin de implantar el tumor y dejar que este se extienda. Por último, los modelos genéticamente modificados se logran a través de la ingeniería genética y tecnología de manipulación embrionaria al inyectar ADN de genes mutantes que causan cáncer a óvulos ya fecundados de ratones.

#### TAMBIÉN EXISTEN LAS MALAS PRÁCTICAS EXPERIMENTALES

La investigación preclínica realizada por la academia, por el gobierno y compañías privadas, da a conocer sus resultados a través de la publicación de artículos científicos. Ahora bien, la comunidad científica está enfrentando una crisis de reproducibilidad de sus investigaciones. Se habla de reproducibilidad cuando se confirman los resultados obtenidos en un estudio previo, al obtener resultados equivalentes en condiciones similares. La investigación preclínica, que en su mayoría utiliza animales, es actualmente una de las áreas más susceptibles a los problemas de reproducibilidad. Una investigación centrada en confirmar los hallazgos de 53 publicaciones de experimentación preclínica, enfocada en el campo del cáncer, mostró que únicamente 6 (11 %) de los estudios fueron reproducibles (Keen, 2019). Entre los factores que están causando esta crisis se encuentran: una mala supervisión, análisis estadísticos deficientes,



© Miguel Ángel Andrade. De la serie *Ofrenda Izta Andrade*.

diseños débiles de investigación y la ausencia de información imprescindible (Rodrigo-Calduch, 2021). Sorprendentemente, se ha observado que el 60 % de las publicaciones tiene deficiencia de información relacionada con el uso de animales, entre las que se incluyen: el número total de animales usados, el grupo experimental al que fueron asignados (control vs. tratamiento), características propias de la especie, y cómo fueron alojados y manipulados (Rodrigo-Calduch, 2021). Sogi (2023) menciona el término *research waste*, o despilfarro en la investigación, que se refiere a los resultados de investigaciones de baja calidad, con escasa utilidad para los responsables de políticas sanitarias y médicos. Este despilfarro se genera debido a errores acumulados a lo largo de las distintas fases del proceso de investigación: más del 50 % de la investigación biomédica realizada no se publica, más del 50 % presenta fallos de diseño que podrían haberse corregido o eran evitables, y más del 50 % no puede utilizarse, se reporta de manera

incompleta o ambas cosas (Sogi, 2023). Desde una perspectiva financiera se estima que alrededor del 15 % de la inversión en investigación alcanza su aprovechamiento máximo, mientras que el resto se ve afectado por errores corregibles, lo que evidencia oportunidades significativas para optimizar el uso de los recursos de manera más eficiente (Sogi, 2023).

Además, quienes realizan las investigaciones no quieren publicar los hallazgos negativos encontrados y las revistas prefieren publicar artículos que contengan descubrimientos significativos y novedosos. En consecuencia, muchos resultados de los experimentos no son publicados, conduciendo a que exista un sesgo en las publicaciones y en el conocimiento disponible en el área. Publicar únicamente resultados positivos (por ejemplo: el tratamiento X ayuda a una patología) y no los resultados negativos (el tratamiento X no ayuda a una patología), provoca una predisposición del éxito de los tratamientos hasta en un 30 %, lo cual puede afectar las decisiones clínicas. Además, no contemplar los resultados negativos puede llevar a la duplicación innecesaria de

experimentos que dañan a los animales, ser un gasto innecesario de recursos y obstruir el progreso de la investigación (Keen, 2019; Rodrigo-Calduch, 2021).

#### **ACCIONES PARA ENFRENTAR LOS DESAFÍOS EN LA EXPERIMENTACIÓN**

Como una forma de afrontar los inconvenientes observados en la experimentación animal, se han puesto en práctica varias medidas para mejorar las metodologías existentes, la calidad de la investigación y, sobre todo, vigilar el bienestar de los animales usados en experimentación. La estrategia conocida como las Tres Erres (“3Rs”) –Reducción, Refinamiento y Reemplazo– es el principio rector para el uso ético de los animales (Doke y Dhawale, 2015). La Reducción se refiere a los métodos que ayudan a reducir el número de animales usados. El Refinamiento hace referencia a los métodos que mejoren el bienestar animal. Mientras que el Reemplazo es entendido como la aplicación de métodos que sustituyen o evitan el uso de animales. Para implementar esta estrategia, se estudian y usan diferentes métodos alternativos, que son significativamente más rápidos y menos costosos. Entre estos se encuentran los cultivos celulares y de tejidos humanos, los modelos de computadora para realizar simulaciones, el uso de inteligencia artificial, así como los órganos en chips (Doke y Dhawale, 2015).

#### **LEGISLACIÓN Y NORMATIVIDAD ENFOCADA EN ANIMALES DE LABORATORIO**

Las leyes y regulaciones tomadas para el uso y cuidado de animales de laboratorio varían entre países. Con respecto a México, se ha realizado un esfuerzo para la vigilancia en la experimentación animal. La Norma Oficial Mexicana NOM-062-ZOO-1999, publicada en el DOF en el 2001 por la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), regula los puntos éticos y técnicos más importantes para el cuidado y uso de animales de laboratorio, exigiendo que las instituciones cuenten con un Comité Interno para el Cuidado y Uso de los Animales de Laboratorio (CICUAL). Sin embargo, pese a los esfuerzos nacionales, es necesaria la actualización de la normativa con el fin

de abordar los vacíos regulatorios y la aplicación de la legislación actual, ya que se ha estimado que únicamente el 54 % de las instituciones nacionales que usan animales con fines científicos tienen CICUAL.

En tanto la experimentación con animales continúa, esta debe seguir siendo sometida a una evaluación crítica permanente, además de que se deben seguir implementando medidas para mejorar las metodologías existentes, la calidad de la investigación y, principalmente, vigilar el bienestar de los animales usados en experimentación.

#### **R E F E R E N C I A S**

- Browning H y Veit W (2022). The sentience shift in animal research. *The New Bioethics* 28:299-314.
- De Jesús-Monge WE (2015). El ratón como base de modelos de cáncer humano: una valiosa herramienta en la investigación oncológica. *Galenus* 17:1-4.
- Doke SK and Dhawale SC (2015). Alternatives to animal testing: A review. *Saudi Pharmaceutical Journal* 23:223-229.
- Keen J (2019). Wasted money in United States biomedical and agricultural animal research. In Herrmann K and Jayne K (Eds.), *Animal Experimentation: Working Towards a Paradigm Change* (pp. 244-272). Brill, Netherlands.
- Rodrigo Calduch T (2021). El sesgo de publicación y la no reproducibilidad en el balance ético de los proyectos de investigación con animales. *Revista de Bioética y Derecho* 51:61-79.
- Sogi GM (2023). Research waste. *Contemporary Clinical Dentistry* 14:179.
- Schlander et al. (2021). How much does it cost to research and develop a new drug? A systematic review and assessment. *Pharmacoeconomics* 39:1243-1269.
- Téllez Ballesteros E y Vanda Cantón B (2020). Cuestionamientos éticos a la generación de conocimiento en la investigación biomédica con animales no humanos. *Revista de Bioética y Derecho* 49:173-189.
- Van Norman GA (2019). Limitations of animal studies for predicting toxicity in clinical trials: is it time to rethink our current approach?. *JACC: Basic to Translational Science* 4:845-854.
- Zurita-Cruz et al. (2019). De la investigación a la práctica: fases clínicas para el desarrollo de fármacos. *Revista Alergia México* 66:246-253.

**Patricia Frías Álvarez  
Gustavo Ortiz Millán  
Instituto de Investigaciones Filosóficas  
Universidad Nacional Autónoma de México  
[patricia.frias@filosoficas.unam.mx](mailto:patricia.frias@filosoficas.unam.mx)**

© Miguel Ángel Andrade. De la serie *Ofrenda Izta Andrade*.



# Inmunoterapia: el sistema inmunitario en la batalla contra el cáncer

**Leonardo Daniel Álvarez Coronel  
Nohemí Salinas-Jazmín**

¿Alguna vez te has preguntado por qué aún no se ha logrado erradicar el cáncer? Para empezar, cuando hablamos de cáncer no nos referimos a una sola enfermedad, sino a un conjunto de ellas. Las células cancerosas, que surgen de la transformación de células normales, adquieren la capacidad de crecer y dividirse a una velocidad mayor que la de las células normales. Estas células transformadas pueden invadir otros tejidos, crear nuevos vasos sanguíneos para obtener nutrientes y desarrollar mecanismos que evaden a las células de nuestro sistema inmunitario. En este artículo exploraremos cómo el sistema inmunitario se activa para identificar y destruir células cancerosas, de qué manera las células tumorales logran escapar de estos mecanismos y cómo estos conocimientos han permitido desarrollar nuevas terapias contra el cáncer.

## **¿CUÁLES SON LAS TERAPIAS CONTRA EL CÁNCER?**

El cáncer es una de las principales causas de muerte en el mundo. De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) el cáncer ocupa el tercer lugar en mortalidad, y su incidencia ha aumentado considerablemente en la última década. Según el Consenso Mexicano sobre

Diagnóstico y Tratamiento del Cáncer Mamario, los tratamientos para combatir esta enfermedad no son completamente eficaces (Cárdenas-Sánchez, 2021). Por ejemplo:

La cirugía es una estrategia que permite extraer el tejido afectado. No obstante, en ocasiones pueden quedar células cancerosas remanentes que resultan indetectables, y basta una sola célula para que la enfermedad vuelva a desarrollarse.

- La quimioterapia tiene como pilar el uso de medicamentos citotóxicos para eliminar las células cancerosas. Sin embargo, muchos de ellos también afectan a las células sanas, causando reacciones adversas o efectos secundarios. Además, con el tiempo, las células cancerosas pueden desarrollar mecanismos para resistir el efecto de estos medicamentos.
- Ante este panorama, se han explorado nuevas estrategias para tratar de atacar al cáncer. Dichas estrategias aprovechan el conocimiento que se tiene sobre la expresión de antígenos tumorales y los mecanismos de evasión de la respuesta inmune que desarrollan las células cancerosas. Los antígenos tumorales son moléculas que resultan de los cambios (mutaciones) en el material genético (el ADN) de las células normales al transformarse en células tumorales.

#### **EL SISTEMA INMUNITARIO ES CAPAZ DE RECONOCER A LAS CÉLULAS CANCEROSAS**

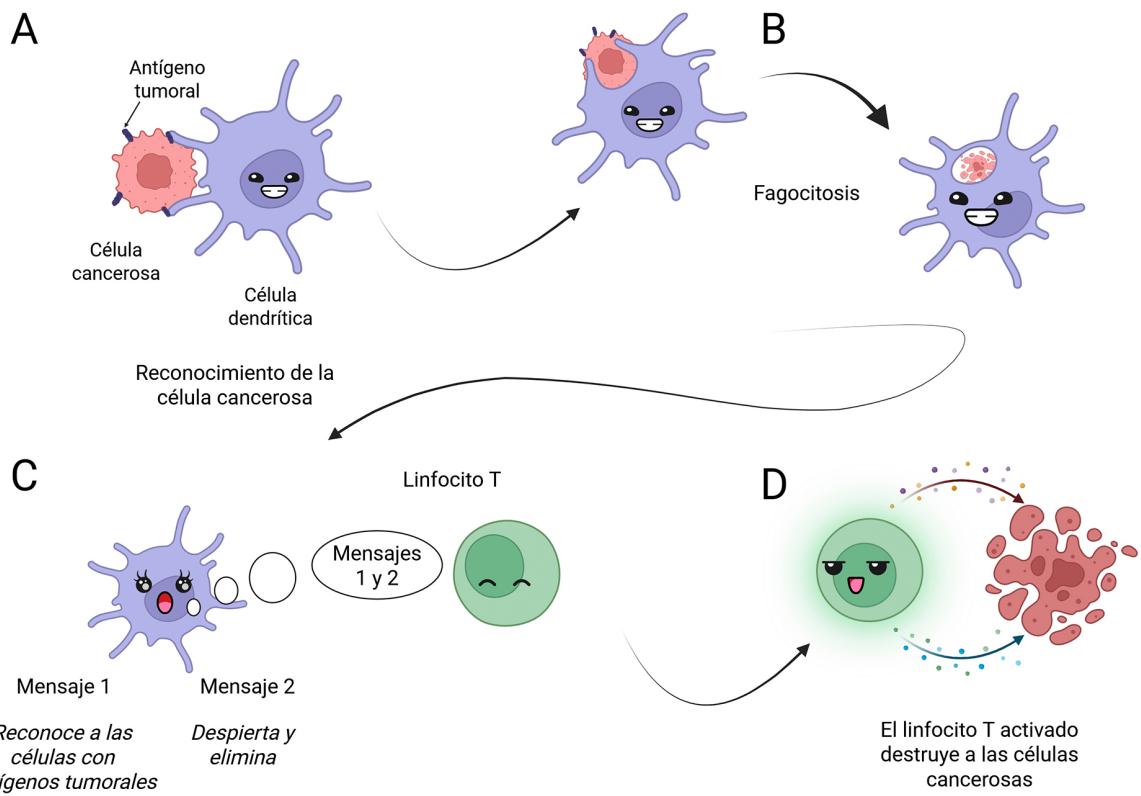
La teoría de la edición inmunológica propone que las células tumorales y las células del sistema inmunitario tienen una primera batalla –la inmunovigilancia–, en donde se activan respuestas por parte de las células del sistema inmunitario destinadas a identificar y eliminar células cancerosas (Velázquez *et al.*, 2017). Este proceso comienza cuando las células dendríticas, una población celular del sistema inmunitario, reconocen antígenos tumorales presentes en la superficie de las células cancerosas (Figura 1A).

Posteriormente, las células dendríticas llevan a cabo un proceso conocido como fagocitosis (Figura 1B), que consiste en “comerse” a las células cancerosas con el objetivo de procesar el antígeno tumoral y comunicar a otras células inmunitarias sobre la amenaza. Una vez procesados los antígenos tumorales, las células dendríticas viajan a los nódulos linfáticos (sitios especializados localizados en diversos lugares de nuestro cuerpo). Allí ocurrirá el siguiente paso de la respuesta inmune: la presentación del antígeno a los linfocitos T (de León y Pareja, 2018).

Los linfocitos T son células que se originan en la médula ósea, ubicada en los huesos; de ahí viajan al timo, donde son entrenados mediante un proceso llamado maduración. Durante esta etapa, desarrollan el receptor de células T (TCR, por sus siglas en inglés), una proteína que les permite reconocer antígenos tumorales. En su primer entrenamiento, la selección positiva, aprenden a identificar las células propias del cuerpo. En el segundo, la selección negativa, aquellos linfocitos que atacan células propias son eliminados para prevenir enfermedades autoinmunes. Una vez maduros, los linfocitos T se trasladan a los nódulos linfáticos, donde permanecen en estado de reposo, “dormidos”, a la espera de ser activados por las células dendríticas. Para lograr esta activación, las células dendríticas deben entregar dos mensajes. El primer mensaje consiste en indicar que el antígeno tumoral reconocido por el TCR ha sido detectado. El segundo mensaje señala que deben activarse para eliminar a las células que expresan el antígeno tumoral (Figura 1C). En este segundo mensaje participan proteínas conocidas como puntos de control inmunitario estimuladores, que actúan como interruptores que “activan” la respuesta inmune (Arafat, 2024).

#### **¿QUÉ SON LOS PUNTOS DE CONTROL INMUNITARIO Y POR QUÉ SON TAN IMPORTANTES?**

Para empezar, se llaman puntos de control inmunitario porque se encargan de regular la respuesta que desarrollan los linfocitos T. Cuando estos deben eliminar células cancerosas, reciben mensajes de



**Figura 1.** Desarrollo de la respuesta inmunitaria antitumoral. Las células dendríticas son capaces de reconocer la expresión de los antígenos tumorales en las células cancerosas (A), posteriormente las fagocitan (B) y les entregan dos mensajes (1 y 2) a los linfocitos T (C), lo que permite al linfocito T activarse para eliminar a las células tumorales (D). Mensaje 1: Reconoce a las células con antígenos tumorales. Mensaje 2: Despierta y elimina. Imagen creada con BioRender.

activación a través de puntos de control estimuladores. En ausencia de amenaza, otras proteínas a cargo de los puntos de control inhibidores los mantienen en reposo.

El equilibrio entre estos dos mensajes es fundamental: si no hay mensaje estimulador, el linfocito T no se activa y no ataca a las células tumorales; si falta el mensaje inhibidor, el linfocito T puede permanecer activo y dañar células sanas (Arafat, 2024).

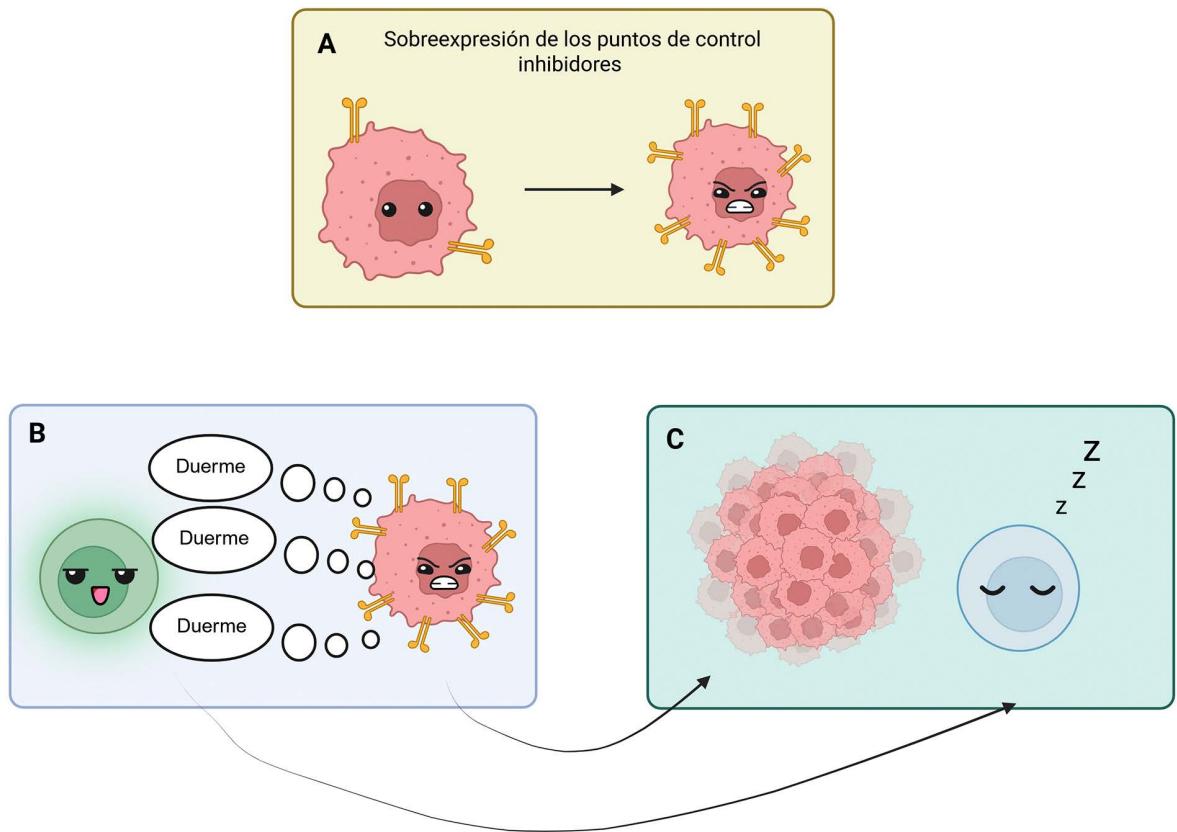
Una vez que la célula dendrítica transmitió los dos mensajes a los linfocitos T, estos desarrollan una serie de mecanismos que les permiten reconocer directamente los antígenos de las células cancerosas y ejercer una respuesta efectora para eliminarlas (Figura 1D).

En este escenario, las células T logran eliminar las células cancerosas; sin embargo, como se mencionó previamente, una de las características principales de las células cancerosas es que se dividen sin control. Por ello, con el tiempo, algunas células tumorales logran resistir el ataque del sistema inmunitario y

otras nuevas pueden surgir y escapar de la inmunovigilancia, lo que lleva a la segunda fase de la edición inmunológica: la fase de equilibrio.

#### ¿NUESTRO PROPIO SISTEMA INMUNITARIO FOMENTA LA PROGRESIÓN DEL CÁNCER?

Pero si nuestro sistema inmunitario logró mantener en equilibrio al cáncer, ¿por qué este progresiona? Esta cuestión es muy interesante y, hasta cierto punto, contradictoria. Las células del sistema inmunitario reconocieron y eliminaron únicamente a las células cancerosas que expresan en grandes cantidades antígenos tumorales. Sin embargo, algunas células cancerosas pueden no expresarlos o hacerlo en niveles muy bajos, lo que les permite escapar de la respuesta inmune. Estas células cancerosas proliferan y rompen con el equilibrio que existía. Ahora inicia una nueva etapa de la edición inmunológica:



**Figura 2.** Los puntos de control inhibitorio duermen a los linfocitos T. Las células cancerosas para evadir la respuesta inmunitaria expresan muchas proteínas de control inhibitorio (A). El aumento en la expresión de las proteínas de control inhibitorio provoca que los linfocitos T activados se “apaguen” (B). Al recibir estos mensajes, los linfocitos T ya no realizan sus funciones efectoras, lo cual es aprovechado por las células cancerosas para multiplicarse (C). Imagen creada con BioRender.

el escape, donde las células cancerosas adquieren más habilidades que les permiten evadir la respuesta del sistema inmunitario (Velázquez *et al.*, 2017). Entonces, irónicamente, el mismo sistema inmunitario se encargó de seleccionar, de manera indirecta, a las células cancerosas con las mejores capacidades para evadir los mecanismos de la respuesta inmune.

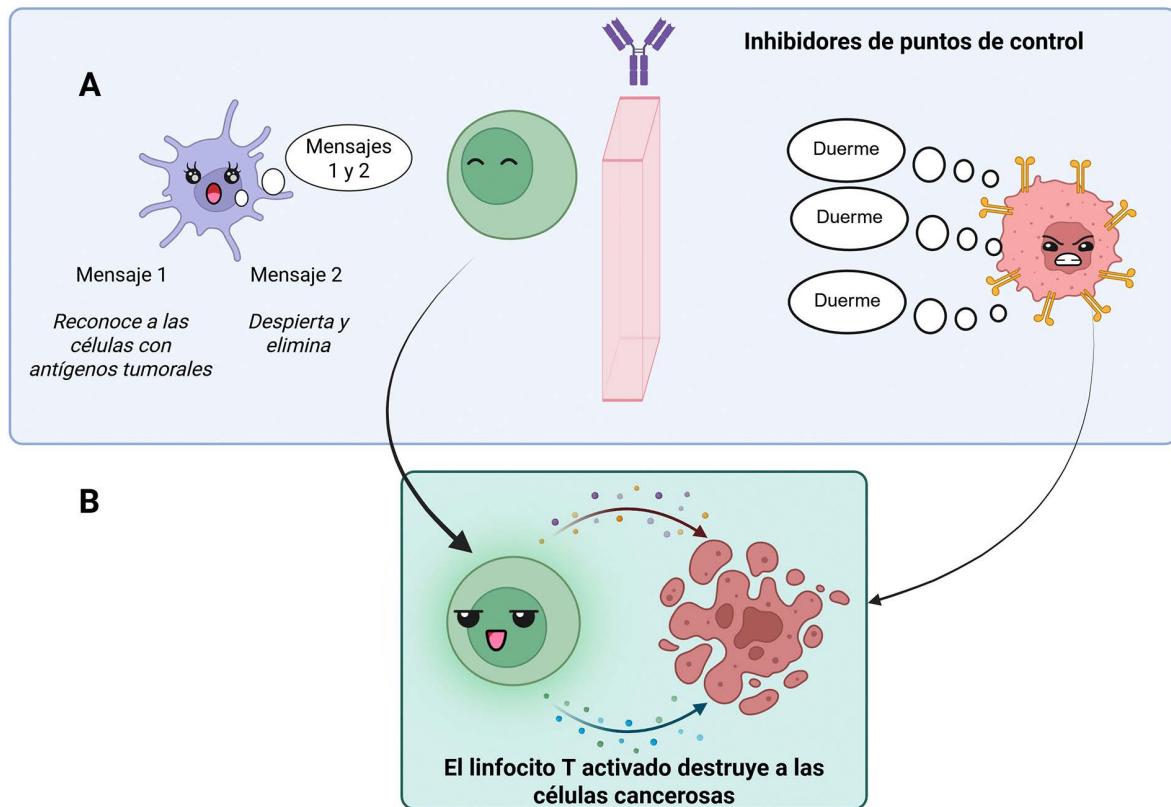
#### LOS PUNTOS DE CONTROL INHIBIDORES PUEDEN PROTEGER A LAS CÉLULAS CANCEROSAS

Entre los mecanismos que las células cancerosas desarrollan de manera ingeniosa para evadir la respuesta inmune se encuentra el aumento en la expresión de puntos de control inmunitarios inhibidores en su superficie (Figura 2A). Esto permite entregar a los linfocitos T muchos mensajes para que se duerman, por lo que, a pesar de haberse activado con

los mensajes de la célula dendrítica, el linfocito T termina durmiendo cuando se enfrenta a una célula cancerosa que sobreexpresa los puntos de control inmunitario inhibidores (Figura 2B). De esta forma, las células cancerosas pueden crecer sin control, ya que no hay linfocitos T activos que las eliminen (Figura 2C) (Arafat, 2024).

#### LOS INHIBIDORES DE PUNTOS DE CONTROL MANTIENEN DESPIERTO AL SISTEMA INMUNITARIO

El conocimiento de estos mecanismos de evasión de la respuesta inmune ha permitido el desarrollo de medicamentos que funcionan como “barreras”, impiéndole que las proteínas de los puntos de control inhibitorio envíen los mensajes para que se duerman los linfocitos T. Estos medicamentos se conocen como inhibidores de los puntos de control inmunitario, y gracias a su descubrimiento, James Allison y Tasuku Honjo ganaron el Premio Nobel de Medicina en 2018.



**Figura 3.** Los inhibidores de los puntos de control inmunitario permiten que nuestro sistema inmunitario esté despierto. Los inhibidores de los puntos de control inmunitario (anticuerpos terapéuticos) actúan como barrera para impedir que los linfocitos T se duerman como consecuencia de los mensajes de los puntos de control inhibidores expresados por las células tumorales (A). Se favorece que los linfocitos T reciban los mensajes de las células dendríticas, se activen y eliminen a las células cancerosas (B). Imagen creada con BioRender.

Los inhibidores de puntos de control inmunitario disponibles son anticuerpos (proteínas con una estructura característica en forma de "Y"). Al unirse a los puntos de control inhibitorios, actúan como una barrera que evita que los linfocitos T reciban los mensajes de las células cancerosas que los inducen a dormir (Figura 3A). Al evitar que los mensajes emitidos por las células cancerosas, a través de los puntos de control inhibitorios, lleguen a los linfocitos T (Figura 3A), se permite que los linfocitos T se activen y eliminen a las células cancerosas (Figura 3B) (Arafat, 2024).

#### CONOCIMIENTO ACTUAL DE LOS INHIBIDORES DE PUNTO DE CONTROL

Desde que se aprobó el primer inhibidor de punto de control inmunitario en 2011 hasta enero de 2024, la agencia regulatoria de los Estados Unidos de América, la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA), ha aprobado únicamente 11 inhibidores de los

puntos de control, cada uno con indicaciones para diferentes tipos de cáncer. El primer inhibidor de punto de control fue ipilimumab, utilizado para tratar el melanoma, un tipo de cáncer de piel (Hadfield *et al.*, 2024).

A pesar de que el primer inhibidor de punto de control inmunitario se aprobó en 2011, las bases para su desarrollo comenzaron desde 1983, cuando el equipo de James Allison identificó a la proteína conocida como receptor de antígeno de células T. Más tarde, en 1987, se descubrió la primera proteína de punto de control inhibitoria, conocida como Antígeno-4 asociado a Linfocitos T Citolíticos (CTLA-4) (Korman *et al.*, 2022).

Actualmente se conocen más de diez puntos de control inmunitario; sin embargo, solo se han aprobado inhibidores de puntos de control inmunitario contra CTLA-4 y contra el eje de la Proteína de Muerte Celular 1/Ligando 1 de la Proteína de Muerte Celular, mejor

conocido como el eje PD-1/PD-L1. Aunque se inició el bloqueo de los puntos de control dirigiéndose a CTLA-4 con ipilimumab, el mayor desarrollo de estos medicamentos se ha centrado en el eje PD-1/PD-L1. Sorprendentemente, se han aprobado 8 anticuerpos contra este eje. En el mercado existen 5 anticuerpos dirigidos contra PD-1: pembrolizumab, nivolumab, cemiplimab, dostarlimab y tislelizumab; mientras que para PD-L1 existen tres anticuerpos: atezolizumab, avelumab y durvalumab (Hadfield *et al.*, 2024).

Aunque en México se encuentran aprobados los inhibidores de punto de control inmunitario, no hay datos estadísticos disponibles sobre su impacto terapéutico. Sin embargo, para tener una idea del avance de estos medicamentos, según datos publicados en Estados Unidos, el dinero destinado a su uso y la cantidad de personas recetadas con inhibidores de punto de control han aumentado exponencialmente en la última década. Entre 2011 y 2021, los gastos por el uso de inhibidores de puntos de control inmunitario aumentaron de 2.8 millones de dólares a 4.1 mil millones de dólares. La cantidad de personas recetadas en 2011 pasó de 94 a 462,049 recetas en 2021 con seis inhibidores de puntos de control. El gasto promedio por receta, o precio promedio de los medicamentos, disminuyó un 70%, de \$29,795.88 en 2011 a \$8,914.69 en 2021, lo que representa un gran avance en el campo de los inhibidores de puntos de control inmunitario (Shin *et al.*, 2023).

#### ¿A QUÉ DESAFÍOS SE ENFRENTAN LOS INHIBIDORES DE PUNTO DE CONTROL INMUNITARIO?

A pesar de que los inhibidores de puntos de control han resultado una estrategia novedosa para combatir el cáncer, existen diferentes inconvenientes en estos medicamentos, como (Sasikumar y Ramachandra, 2022):

1. Baja tasa de respuesta: solo entre el 20 % y el 40 % de los pacientes responden a estas terapias.
2. Eventos adversos relacionados con el sistema inmunitario, provocados principalmente por la desregulación de su equilibrio.
3. Accesibilidad limitada a las células tumorales debido al gran tamaño de los anticuerpos.
4. Compleja logística de distribución, al igual que otras terapias biológicas (como insulina, somatotropina, eritropoyetina, sueros, entre otros), se requiere transporte y almacenamiento en cadena de frío debido a su naturaleza termolábil. Los inhibidores de puntos de control inmunitario surgieron como una estrategia terapéutica novedosa que mantiene despierto a nuestro sistema inmunitario, permitiendo expandir la visión terapéutica que se tenía para combatir al cáncer. Ya no solo se consideran tratamientos convencionales, como la cirugía y la quimioterapia, como únicas opciones para tratar a los pacientes con cáncer. En la actualidad, los tratamientos que fortalecen y mantienen despierto a nuestro sistema inmunitario están tomando relevancia, pero todavía hay un largo camino que recorrer y explorar en beneficio de la salud.

#### AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica de la UNAM (Clave IA204323) y a SECIHTI (CF-2023-I-92). L.D.A.C. es estudiante de maestría del Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias Bioquímicas de la UNAM y es apoyado por SECIHTI (CVU 1314913).

#### R E F E R E N C I A S

- Arafat HM (2024). A comprehensive review of immune checkpoint inhibitors for cancer treatment. *International Immunopharmacology* 143 (Pt 2):113365.
- Cárdenas-Sánchez J (2021). Consenso Mexicano sobre Diagnóstico y Tratamiento del Cáncer Mamario. *Gaceta Mexicana de Oncología* 20 (Supl. 2):1-105.
- De León J y Pareja A (2018). Inmunología del cáncer I: bases moleculares y celulares de la respuesta inmune antitumoral. *Horizonte Médico (Lima)* 18(3):80-89.
- Hadfield MJ, Benjamin DJ, Krell J *et al.* (2024). The evolving posology and administration of immune checkpoint inhibitors: subcutaneous formulations. *Trends in Cancer* 10(7):579-583.
- Korman AJ, Garrett-Thomson SC and Lonberg N (2022). The foundations of immune checkpoint blockade and the ipilimumab approval decennial. *Nature Reviews Drug Discovery* 21(7):509-528.



© Miguel Ángel Andrade. De la serie *Ofrenda Izta Andrade*.

Sasikumar PG and Ramachandra M (2022). Small Molecule Agents Targeting PD-1 Checkpoint Pathway for Cancer Immunotherapy: Mechanisms of Action and Other Considerations for Their Advanced Development. *Frontiers in Immunology* 13:752065.

Shin YE, Kumar A and Guo JJ (2023). Spending, Utilization, and Price Trends for Immune Checkpoint Inhibitors in US Medicaid Programs: An Empirical Analysis from 2011 to 2021. *Clinical Drug Investigation* 43(4):289-298.

Velázquez PMJ, Huerta J and Cravioto P (2017). Interacciones entre el cáncer y el sistema inmunológico. *Alergia, Asma e Inmunología Pediátricas* 26(2):56-63.

**Leonardo Daniel Álvarez Coronel**  
**Nohemí Salinas-Jazmín**  
**Departamento de Farmacología**  
**Facultad de Medicina**  
**Universidad Nacional Autónoma de México**  
[nohemysj@unam.mx](mailto:nohemysj@unam.mx)

© Miguel Ángel Andrade. De la serie *Ofrenda Izta Andrade*.



# Obra gráfica: ritualidades y las travesías del café

Miguel Ángel **Andrade**

© Miguel Ángel Andrade. De la serie *Café Andrade*.



© Miguel Ángel Andrade. De la serie *Ofrenda Izta Andrade*.



Este número de *Elementos* presenta fotografías de Miguel Ángel Andrade pertenecientes a tres series. Desde la dimensión ritual, está la celebración de san Juan, el 24 de junio, en el centro ceremonial de la Xochipila en Xicotepec de Juárez, Puebla; y la ofrenda en honor al cumpleaños de “la Volcana” Iztaccíhuatl, Rosita. Por otro lado, se presenta una mirada documental de la producción cafetalera en el estado de Puebla. En estas fotografías podemos ver la conexión y el agradecimiento con la tierra de distintos pueblos.

## RITUALIDADES

Aunque en las ciudades se realiza la mayoría de las manifestaciones sociales que se promueven y difunden como las tradiciones de nuestro país, las ritualidades ancestrales perviven en las comunidades indígenas y campesinas que mantienen un vínculo cercano con la tierra. En esos rituales permanece la conciencia del “merecimiento”, es decir, la deuda que tenemos por el sustento que recibimos. Por tanto, para mantener el favor, es necesario ofrendar una parte de aquello que se recibe.

© Miguel Ángel Andrade. De la serie Xochipila.



© Miguel Ángel Andrade. De la serie Xochipila.





En la celebración dedicada a san Juan en Xicotepec de Juárez se ofrece también una ofrenda en el centro ceremonial de la Xochipila en agradecimiento por la cosecha; además, se realizan danzas y ceremonias prehispánicas para el Xochipilli, dios de la poesía y el amor.

Por otro lado, en la Sierra Nevada se celebran los cumpleaños de los volcanes: el Popocatépetl y la Iztacchíuatl, don Goyo y Rosita. Cada año, en marzo y agosto respectivamente, se ofrendan fruta, semillas y danzas por parte de los tiemperos de la región para agradecer el agua que riega los campos. Para las comunidades de la región, los volcanes son entes vivos con los que dialogan y de quienes reciben el favor de la lluvia.

Este proyecto implica un recorrido por la sierra de Puebla y un viaje por mi infancia. Pasé mi niñez en una pequeña comunidad observando cómo mi abuela se dividía para atender su tienda de abarrotes, diseñar y confeccionar vestidos y trabajar un cafetal; desde entonces le tengo un profundo aprecio al campo y a las personas que lo trabajan.

En esta serie fotográfica quiero mostrar y compartir los sabores, los aromas y los colores que emergen de la producción de café. Además, pretendo mostrar la resistencia de los productores ante la demanda injusta de los monopolios y la ardua y trabajosa labor que implica llevar el grano desde la planta hasta la taza, para que se valore el trabajo de los cafetaleros.

Miguel Ángel Andrade (Chicontla, Puebla, 1983) es fotógrafo y poeta. Trabaja como gestor cultural y editor en proyectos independientes e instituciones públicas, buscando la integralidad de los procesos en ámbitos dinámicos de la cultura. Ha realizado series fotográficas tanto documentales como artísticas de historias que implican una relación dialógica entre palabra e imagen. Actualmente documenta el contexto y las dinámicas sociales en torno a la producción de café y en las prácticas culturales prehispánicas que perviven en el estado de Puebla.

Instagram: [@miguelangelandrade](https://www.instagram.com/miguelangelandrade/)

© Miguel Ángel Andrade. De la serie *Xochipila*.



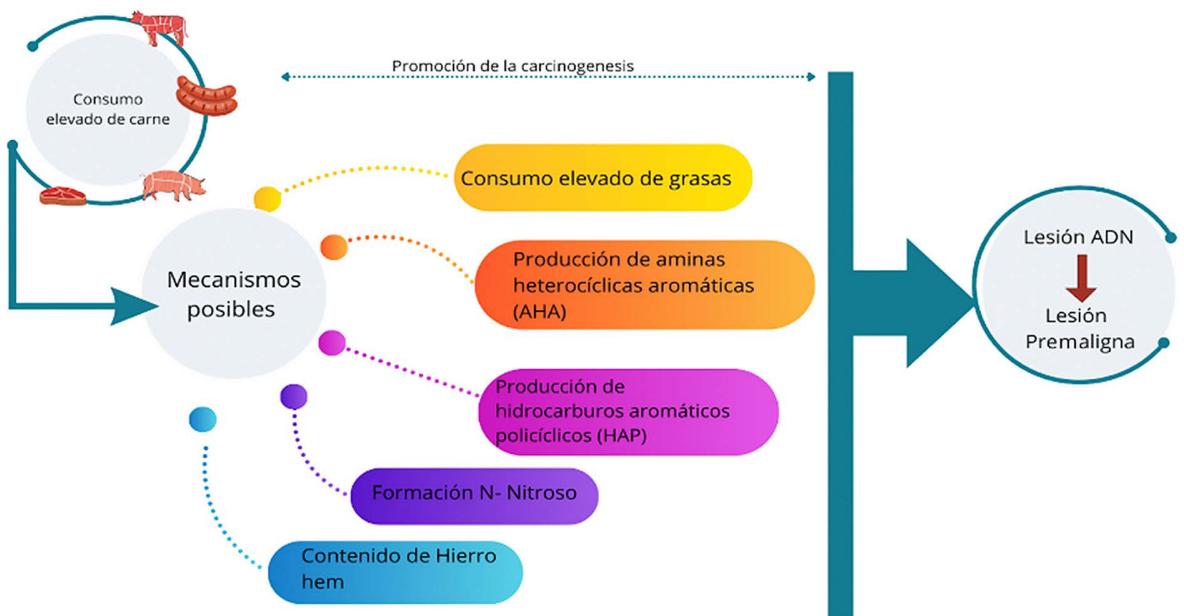
# Carcinógenos en carnes rojas asociados al cáncer colorrectal

**Nadia Vianey Carrillo Reyes**  
**Marisol Neri Sánchez**

La población mexicana se caracteriza por tener un patrón dietético occidentalizado, en el que el consumo de carnes rojas es una de las principales características y que, a su vez, puede ser un factor de riesgo para el desarrollo de enfermedades crónicas no transmisibles como el cáncer. Particularmente, el Fondo Mundial para la Investigación del Cáncer (WCRF, por sus siglas en inglés) ha declarado que comer carne roja puede aumentar el riesgo de desarrollar cáncer (*Meat and Cancer*, 2025), en especial cáncer colorrectal (CCR), que es la neoplasia de mayor frecuencia en vías digestivas y constituye del 9 al 10 % de todos los tipos de cáncer en el mundo. Afecta a hombres y mujeres entre 65 y 75 años, pero su incidencia aumenta drásticamente con la edad (Vanegas Moreno *et al.*, 2020).

En México, cada año se diagnostican cerca de 15 mil casos nuevos de este tipo de cáncer. Los factores de riesgo que pueden incrementar la posibilidad de padecer CCR incluyen la obesidad, la diabetes, el tabaquismo, antecedentes familiares de cáncer de colon, afecciones intestinales inflamatorias (colitis ulcerativa y enfermedad de Crohn), el sedentarismo y el consumo de dietas muy ricas en calorías y en grasas de origen animal (Instituto de Salud para el Bienestar [INSABI], 2023).

En relación con la dieta, se ha descrito que el consumo frecuente de carnes, a largo plazo, se relaciona con un



**Figura 1.** Mecanismos que relacionan el consumo de carne roja con el CCR.

mayor riesgo de CCR, especialmente de carnes rojas (res, cerdo, cordero), incluso con un efecto más fuerte que las carnes procesadas (embutidos) como salchichas, jamón, carne ahumada y enlatada (Vanegas Moreno *et al.*, 2020). En este sentido, en 2023 se registró en México un consumo de carne de res de 16.4 kg per cápita, el cual resultó mayor en 757 gramos al registrado en 2022. A nivel internacional, México fue la segunda nación que presentó el porcentaje de incremento más notable (Consejo Mexicano de la Carne, 2024).

De acuerdo con la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos en los Hogares (ENIGH) en 2022, las familias mexicanas tuvieron un gasto promedio de 2,801 pesos al trimestre atribuido a la compra de carnes, seguido de los cereales y otros alimentos diversos (Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Informática, 2022).

Nutricionalmente, la carne roja es una buena fuente de proteínas, hierro, zinc y vitamina B12, por lo que puede formar parte de una dieta sana y equilibrada; sin embargo, no es necesario consumir este grupo de alimentos todos los días, debido a que existen algunos mecanismos que vinculan el consumo de carne con el cáncer colorrectal.

Los mecanismos posibles que relacionan el consumo elevado de carne con el desarrollo de CCR son complejos e incluyen la promoción de la carcinogénesis por el consumo elevado de grasas, la producción de aminas heterocíclicas aromáticas (AHA) e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) durante la cocción, así como la formación de compuestos N-nitroso y la promoción de la carcinogénesis por el contenido de hierro hem de la carne (Zhou y Rifkin, 2021). Estos compuestos son agentes químicos (carcinógenos) que tienen la posibilidad de lesionar nuestro ADN mediante procesos consecutivos que conllevan a la aparición de lesiones premalignas (Figura 1).

El objetivo de este artículo es explorar estos mecanismos y establecer algunas recomendaciones para disminuir el consumo de carnes rojas en la población mexicana.

## GRASAS

La gastronomía mexicana contiene platillos ricos en grasa. En la zona norte del país, por ejemplo, hay un elevado consumo de cortes de carne roja con alto contenido de grasa. Este componente de la dieta se ha asociado con el desarrollo del CCR; sin embargo, se debe considerar la preparación de

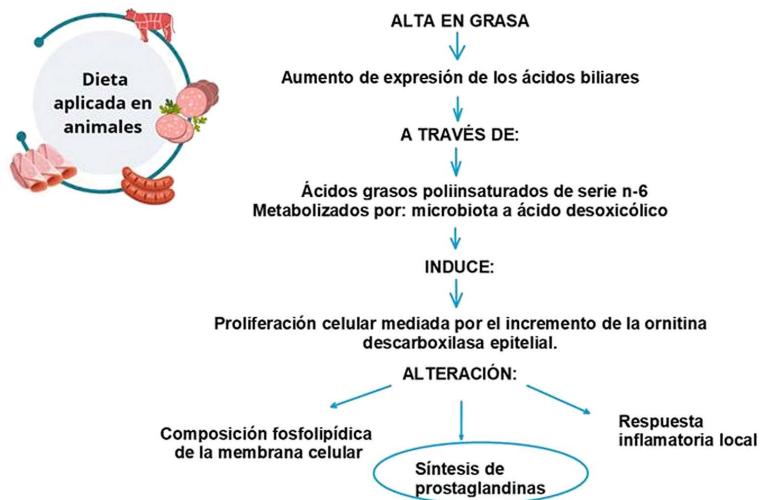
la carne y, en el animal, se toma en cuenta la raza y las condiciones de alimentación. Nutricionalmente, la carne se constituye por agua (65-80 %), proteína (22 %) y grasa (1-15 %). En menor proporción se encuentran sustancias nitrogenadas no proteicas como minerales (hierro y zinc), vitaminas (vitamina A, E, tiamina, niacina, piridoxina, cianocobalamina y biotina) e hidratos de carbono. Otro aspecto importante para considerar, respecto a la grasa como carcinógeno, es la cantidad y calidad de la grasa (animal o vegetal), así como el tipo de ácidos grasos (saturados, monoinaturados y poliinsaturados), pues se ha reportado que influyen durante las fases de promoción y post-iniciación, e incluso en la fase de iniciación en la formación tumoral, como puede ocurrir con las grasas saturadas (contenido en mayor proporción en la carne roja), las cuales son las que más influyen en el CCR (*Meat and Cancer, 2025*).

Un mecanismo para explicar el efecto promotor del CCR de una dieta con alto contenido en grasa (Figura 2) es que aumenta la excreción intestinal de ácidos biliares por parte de los ácidos grasos poliinsaturados de la serie n-6, que son metabolizados por la microbiota a ácido desoxicólico. Estos inducen la proliferación celular mediada por el incremento de la ornitina descarboxilasa epitelial, alterando la composición fosfolipídica de la membrana celular y la síntesis de prostaglandinas, generando una respuesta inflamatoria local (Zhou y Rifkin, 2021).

La evidencia actual muestra una correlación entre el consumo de grasa y el desarrollo de CCR, sin embargo; esta relación sigue siendo controvertida.

#### AMINAS HETEROCÍCLICAS AROMÁTICAS

Las aminas heterocíclicas aromáticas (AAH) son carcinógenos que se forman durante el proceso de cocción de la carne a elevadas temperaturas, desde



**Figura 2.** Mecanismo de la grasa como carcinógeno de las carnes rojas.

180° a 300°, especialmente al asar y freír la carne durante tiempos prolongados. Cuando la elevada temperatura reacciona con los aminoácidos y demás componentes de la carne, se genera un proceso de descomposición térmica de materiales orgánicos en ausencia de oxígeno, llamado pirólisis. Una vez ingerido el alimento, varias enzimas participan en la mediación de este proceso, siendo la más importante la enzima N-acetiltransferasa 2 (NAT2). Esta enzima activa las AAH y ayuda a formar aductos de ADN (Figura 3) que eventualmente dañan el ADN (Sivasubramanian *et al.*, 2023). De hecho, la exposición reiterada a estos carcinógenos por parte de las células que conforman el epitelio intestinal se considera uno de los mecanismos subyacentes a la relación causal entre el consumo de carne roja y el CCR.

#### HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLICÍCLICOS

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) son un conjunto de compuestos orgánicos que contienen dos o más anillos aromáticos, y su particularidad es la baja solubilidad en agua y su alta solubilidad en sustancias lipídicas. Se encuentran naturalmente en el medio ambiente debido al crecimiento industrial; sin embargo, la principal fuente de exposición es a través de la dieta. En México y en otros países

como Brasil y Argentina, es popular el uso del carbón para la cocción de las carnes rojas en mayor medida. Esto conlleva a un contacto directo de la carne o el goteo del jugo de la carne y su grasa con el fuego (alta temperatura), generándose humo negro, lo que da origen a los HAPs. Estos carcinógenos pueden contaminar la carne a través de la pirólisis (descomposición química por calor) directa de los nutrientes (hidratos de carbono, aminoácidos y ácidos grasos) de los alimentos y de su deposición a través del humo producido por la combustión incompleta de materia orgánica. Por lo tanto, las carnes ahumadas o asadas a la parrilla o al carbón contienen altas concentraciones de HAPs (Figura 4).

Una vez metabolizados los HAPs pueden convertirse en epóxidos de HAP-diol a través de enzimas metabólicas (N-acetiltransferasa y la sulfotransferasa) y pueden unirse al ADN, comprometiendo la integridad del ADN celular. Uno de los HAPs más peligrosos por su clasificación como carcinogénico es el benzopireno, el cual se ha asociado con un mayor riesgo de CCR (Cheng *et al.*, 2021).

#### HIERRO HEM Y COMPUESTOS N-NITROSOS

La epidemiología nutricional no ha asociado el consumo de carne blanca, procedente de aves y pescados con el riesgo de CCR y la única diferencia con la carne roja es el contenido de hierro hem, la forma más disponible del elemento, y que, este a

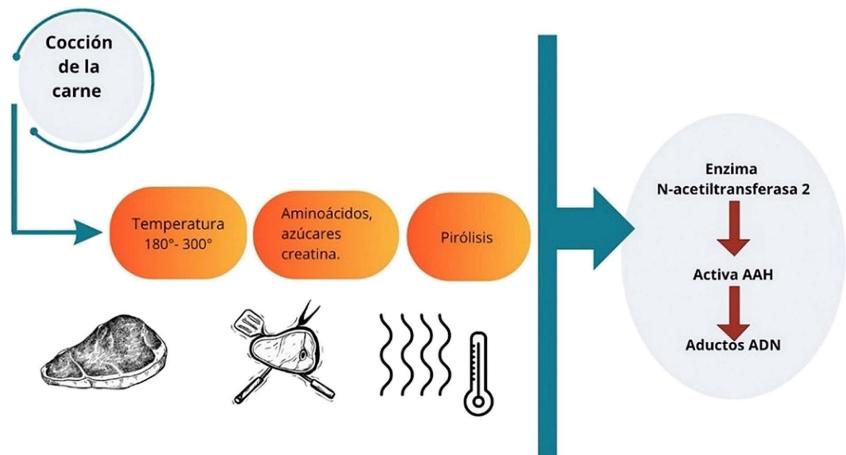


Figura 3. Mecanismo de las AAH como carcinógeno de las carnes rojas.

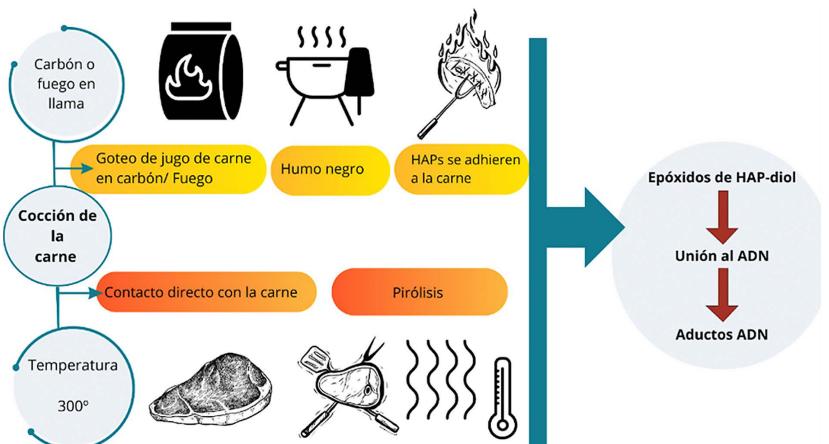


Figura 4. Mecanismo de las HAPs como carcinógeno de las carnes rojas.

su vez promovería la formación de los compuestos N-nitroso (NOCs). Son compuestos químicos inorgánicos derivados del nitrógeno (metabolitos nitrogenados) que se encuentran en cosméticos y cigarrillos, la principal fuente de ingestión es a través de la dieta, y se han asociado con el desarrollo de CCR. Los más conocidos son la nitrosamina y la nitrosamida. Los nitritos y las sales de nitrato son utilizados en las carnes procesadas con el objetivo de alargar su conservación; las sales, en especial, agudizan el sabor y equilibran el color de la carne (Londoño Pereira y Gómez Ramírez, 2021). Algunos alimentos que forman parte de esta categoría son el tocino, salchicha, jamón, pepperoni, chorizo, carne en conserva, etcétera.

Los NOCs se forman principalmente en el estómago y el intestino delgado a través de vías bacterianas, químicas e inflamatorias (Figura 5).

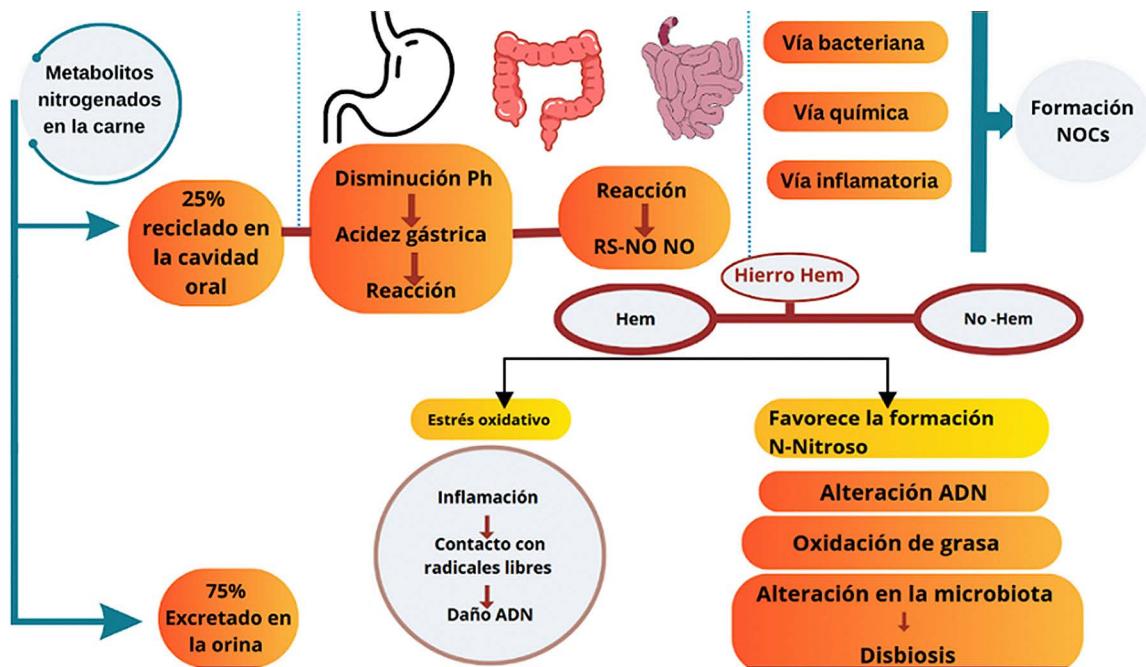


Figura 5. Mecanismo del hierro hem y los NOCs como carcinógenos de las carnes rojas.

Con respecto a la vía química, la mayor parte del nitrato y nitrito de la dieta se absorbe en el tracto gastrointestinal superior. De este, el 75 % es excretado vía urinaria y el 25 % se recicla por las glándulas salivales y se secreta en la cavidad oral. Enseguida, se reduce a nitrito por bacterias orales y se cataliza en otros compuestos relacionados con iones de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ). Los niveles de nitrato en plasma aumentan considerablemente y permanecen elevados durante un periodo prolongado (5 a 6 horas). Algo similar ocurre con los niveles de nitrito que aumentan luego de la ingestión de nitrato (aproximadamente 90 minutos). La bioactivación de los nitritos que se lleva a cabo en el ambiente ácido gástrico representa la vía de biotransformación exógena conocida como vía entero-salival nitrato-nitrito-óxido nítrico, en la cual el nitrito, en presencia de protones, da lugar a la formación de ácido nitroso que se descompone para formar óxido nítrico (ON) y otros óxidos de nitrógeno. Esta conversión se ve reforzada por los polifenoles y otros agentes reductores (antioxidantes) como la vitamina C, presente en alimentos de origen vegetal, que puede ser beneficiosa en el mantenimiento de la integridad de la mucosa gástrica, impidiendo la conversión a nitrosaminas. Las nitrosaminas, requieren

de activación metabólica para formar monoalquilnitrosamina que, a su vez, reacciona como un electrófilo, generando una alquilación de bases de ADN, específicamente del alquilo guanina O6, timidina O4 y el O2 que dan lugar a errores de emparejamiento del ADN (Londoño Pereira y Gómez Ramírez, 2021).

Por otro lado, dentro de la vía bacteriana, es sumamente complejo identificar una cepa bacteriana de la microbiota intestinal, responsable de la formación de NOCs; sin embargo, posiblemente los anaerobios facultativos estén relacionados. Por otro lado, se ha descrito una alteración de la composición microbiana intestinal, ya que en sujetos con ingestiones elevadas de carnes rojas se han encontrado cepas tolerantes a la bilis como *Bacteroides* y disminución de *Firmicutes*. Este desequilibrio podría constituir un ambiente óptimo para el desarrollo del CCR (Kobayashi, 2018).

Referente a la vía inflamatoria, se ha visto que, en pacientes con Enfermedad Inflamatoria Intestinal como la colitis ulcerativa, existe una disbiosis intestinal en el colon, en donde se disminuyen considerablemente el filo de bacterias *Proteobacterias* y

Alimento	ADULTOS		ADOLESCENTES		ESCOLARES	
	Hombres	Mujeres	Hombres	Mujeres	Hombres	Mujeres
<b>Carne de res</b>	3 a 4	3 a 4	3 a 4	3 a 4	3	3
<b>Otras carnes rojas</b>	3 a 4	2 a 3	3 a 4	2 a 3	2 a 3	2 a 3

**Tabla 1.** Número de porciones de carne de res y otras carnes rojas recomendadas a la semana en población mexicana. Fuente: elaboración propia.

Firmicutes (benéficas) y se observan proliferaciones masivas de *Salmonella* y *Escherichia coli* (patógenas). Esta disbiosis intestinal altera el microambiente luminal y promueve la formación de NOCs, además de contribuir a la alteración en la señalización de óxido nítrico, que es el responsable de promover una mayor inflamación y posteriormente el desarrollo del cáncer (Kobayashi, 2018).

#### RECOMENDACIONES PARA DISMINUIR EL CONSUMO DE CARNES ROJAS Y CARNES ROJAS PROCESADAS

El Fondo Mundial para la Investigación del Cáncer recomienda, por un lado, consumir 3 porciones a la semana de carnes rojas (res, ternera, cerdo, cordero, cabra), esto es entre 350 g a 500 g, y de preferencia cortes de carne magros en lugar de cortes grados. Por otro lado, recomienda consumir poco o tener nulo consumo de carne procesada (tocino, jamón, salchicha, chorizo, pepperoni, cecina de res, etcétera).

En México, las nuevas guías alimentarias saludables y sostenibles establecen que disminuir el consumo de carne de res y carnes procesadas protege contra el CCR. Las recomendaciones de porciones sugeridas para este grupo de alimentos por sexo y grupo de edad se presentan en la Tabla 1.

Algunos ejemplos de porciones se encuentran en: 30 g de carne de res o molida de res, 25 g de pechuga de pollo, ½ bistec de res, 25 g de pechuga de pollo aplanada, ¼ pieza tampiqueña (res), 50 g de barbacoa, ½ chuleta de cerdo, 30 g de charales, 11 g de carne seca, ¼ pierna de pollo, 40 g de filete de pescado, 40 g de carne de cerdo, 1/5 taza de atún o un huevo. Además, para aquellas personas que consumen

carnes rojas de forma cotidiana o frecuente, se recomienda ir disminuyendo poco a poco su consumo hasta alcanzar las 2 veces por semana o menos. Por otro lado, en el plato del bien comer se establece un porcentaje del 8 % para este grupo de las carnes, así como evitar alimentos ultraprocesados como embutidos. En su lugar, se debe consumir más frijoles, lentejas, huevo, pollo y pescado, así como más verduras y frutas. Existen preparaciones que pueden cambiar la carne roja por alimentos de origen vegetal; por ejemplo, en una hamburguesa, la carne de res se puede sustituir por soya combinada con zanahoria y sazonada con huevo y especias, lo cual puede constituir un platillo más saludable.

#### CONCLUSIÓN

En las últimas décadas, las carnes rojas y las carnes rojas procesadas se han convertido en uno de los elementos principales de los platillos mexicanos hasta formar parte de nuestro patrón alimentario.

No obstante, el problema de consumir en exceso carnes rojas y carnes rojas procesadas que dan lugar a la generación de los carcinógenos antes expuestos, radica en la formación de aductos de ADN; estos son cadenas de material genético unidas, en este caso a las AAH, HAPs o NOCs, que confieren riesgos genotóxicos, mutagénicos y cancerígenos. Sin embargo; es importante señalar que algunos componentes de la carne son sustancias anticancerígenas esenciales para la nutrición humana (selenio, zinc, omega 3, vitaminas B6, B12, D y ácido fólico), por lo que se debe buscar un equilibrio en el consumo alimentario, sustituyendo el grupo de alimentos de la carne por otros alimentos de origen vegetal como las leguminosas.



© Miguel Ángel Andrade. De la serie *Ofrenda Izta Andrade*.

Además, el Fondo Mundial para la Investigación del Cáncer y la Secretaría de Salud en México señala la importancia de mantener un estilo de vida saludable que incluya la elección de alimentos frescos y naturales, realizar actividad física de manera diaria, evitar el consumo de alcohol, no fumar y mantener un peso saludable para reducir el riesgo de desarrollar CCR.

## R E F E R E N C I A S

Cheng T, Chaosis S, Kodagoda Gamage SM, Lam AK and Gopalan V (2021). Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Detected in Processed Meats Cause Genetic Changes in Colorectal Cancers. *International Journal of Molecular Sciences* 22:10959.

Consejo Mexicano de la Carne. (2024). Compendio Estadístico 2024. Recuperado de: <https://comecarne.org/wp-content/uploads/2024/05/compendio-estadistico-2024-V2.pdf>.

Instituto de Salud para el Bienestar (INSABI) (2023). 31 de marzo | Día Mundial contra el Cáncer de Colon. Gobierno de México. Recuperado de: <https://www.gob.mx/insabi/articulos/dia-mundial-contra-el-cancer-de-colon-31-de-marzo>.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (2022). Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares 2022.

Recuperado de: [https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/enigh/nc/2022/doc/enigh2022\\_ns\\_presentacion\\_resultados.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/enigh/nc/2022/doc/enigh2022_ns_presentacion_resultados.pdf).

Kobayashi J (2018). Effect of diet and gut environment on the gastrointestinal formation of N-nitroso compounds: A review. *Nitric Oxide* 73:66-73.

Londoño Pereira M and Gómez Ramírez BD (2021). Nitratos y nitrilos, la doble cara de la moneda. *Revista de Nutrición Clínica y Metabolismo* 4:110-119.

Meat and cancer (2025). World Cancer Research Fund. Recuperado de: <https://www.wcrf.org/preventing-cancer/topics/meat-and-cancer>.

Sivasubramanian BP, Dave M, Panchal V, Saifa-Bonsu J et al. (2023). Comprehensive Review of Red Meat Consumption and the Risk of Cancer. *Cureus* 15:e45324.

Vanegas Moreno DP, Ramírez López LX, Limas Solano LM, Pedraza Bernal AM y Monroy Díaz ÁL (2020). Revisión: Factores asociados a cáncer colorrectal. *Revista Médica de Risaralda* 26:68-77.

Zhou E and Rifkin S (2021). Colorectal Cancer and Diet. *Gastroenterology Clinics of North America* 50:101-111.

**Nadia Vianey Carrillo Reyes**

**Marisol Neri Sánchez**

**Universidad de la Salud del Estado de México**

**marisolneri@unsa.mx**

© Miguel Ángel Andrade. De la serie *Ofrenda Izta Andrade*.



# Salud mental en tiempos de crisis climática: entre el miedo y la esperanza

**Libertad Paredes-Díaz  
Yolanda Campos-Uscanga**

En 2023, mientras el termómetro global marcaba récords históricos, las personas alrededor del mundo experimentaron los impactos físicos de las olas de calor, una de las manifestaciones más evidentes del cambio climático. Este fenómeno se define como las variaciones de largo plazo en la media del clima esperado para una región, y es el resultado de dos factores: la variabilidad climática natural y el cambio climático inducido por el hombre. De manera natural, puede deberse a cambios en la órbita terrestre, a la actividad solar, al movimiento de placas tectónicas o a modificaciones en las corrientes oceánicas y atmosféricas. Sin embargo, el cambio climático que hoy experimentamos no es atribuible a causas naturales; es en mayor medida originado por las actividades humanas (antropogénicas), como la quema excesiva de combustibles fósiles, la deforestación y la agricultura intensiva, que liberan metano y óxidos de nitrógeno. Vivimos un cambio climático antropogénico que incrementa la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, alterando los patrones climáticos globales y regionales. Estos cambios se manifiestan principalmente en el aumento de la temperatura ambiental y del océano, cambios en la precipitación y aumento en la frecuencia e intensidad de las sequías y de los huracanes (IPCC, 2023).

En la actualidad, es común experimentar múltiples eventos extremos que ocurren simultáneamente o con poca diferencia entre ellos. Esto puede tener un impacto aún mayor en las personas y el ambiente, como en el caso de una sequía combinada con calor extremo, que aumenta el riesgo de incendios forestales, pérdida de cosechas y mortalidad de especies. Con el aumento del nivel del mar, las tormentas severas también pueden generar inundaciones costeras debido a la combinación de mareas altas, lluvias intensas y pérdida de manglares.

#### **CAMBIO CLIMÁTICO: DEL FENÓMENO FÍSICO A LA AMENAZA SANITARIA**

*The Lancet Countdown* América Latina es un proyecto internacional de investigación que monitorea los impactos del cambio climático en la salud humana y evalúa las respuestas sociales a esta amenaza. En su informe 2023, elaborado con la colaboración de más de 35 instituciones académicas y agencias de la ONU, se advierte que América Latina enfrenta múltiples riesgos derivados del cambio climático:

1. Enfermedades infecciosas: el cambio climático aumenta las condiciones de idoneidad climática para la propagación de enfermedades transmitidas por vectores como el dengue, especialmente en regiones donde el vector y los microorganismos son endémicos, como América Latina. Este impacto se combina con factores socioambientales como el acceso limitado a saneamiento básico y la eficacia de las medidas de control vectorial que también determinan la incidencia de estas enfermedades.
2. Seguridad alimentaria: las olas de calor y las sequías deterioran la calidad, disponibilidad, acceso y asequibilidad de los alimentos, afectando directamente la nutrición de la población.
3. Calor extremo: la exposición prolongada a altas temperaturas tiene consecuencias negativas para la salud, desde malestar general y dolores de

cabeza hasta insolación y muerte. Estas condiciones son particularmente graves en personas con comorbilidades, adultos mayores o bajo tratamientos médicos específicos (Hartinger *et al.*, 2024), entre los que se incluyen muchos fármacos para tratar trastornos mentales.

En México, el cambio climático ya muestra impactos tangibles sobre la salud humana. Según el *Informe de Vigilancia Epidemiológica* de la Secretaría de Salud, durante 2023 se reportaron 4,306 casos asociados a temperaturas naturales extremas y 421 defunciones relacionadas. Estos datos reflejan los efectos más visibles: los daños físicos. Sin embargo, el impacto no se limita al cuerpo. Apegándonos a la definición de la Organización Mundial de la Salud –que entiende la salud como un estado de completo bienestar físico, mental y social, y no solamente como la ausencia de enfermedad–, resulta fundamental analizar también los efectos del cambio climático en la salud mental, una dimensión muchas veces olvidada.

#### **IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA SALUD MENTAL**

El informe 2023 del *Lancet Countdown* América Latina advierte que los impactos del cambio climático en la salud no se limitan a enfermedades físicas: también se observan efectos sobre la salud mental, incluyendo el aumento de la ansiedad, la depresión y el deterioro del bienestar emocional, especialmente en poblaciones vulnerables expuestas a inseguridad alimentaria, desplazamientos forzados y olas de calor (Hartinger *et al.*, 2024).

Si consideramos que en el periodo 2013-2022, los bebés y las personas mayores de 65 años experimentaron, en promedio, un 248 % y un 271 % más de días de ola de calor por año que en 1986-2005, respectivamente, podremos sugerir que los efectos sobre la salud mental derivados de esta exposición son altamente preocupantes, ya que se sabe que las altas temperaturas están ligadas al incremento de las tasas de suicidio (Clayton *et. al.*, 2017). Esto tiene relevancia porque a medida que los eventos climáticos severos vinculados con el cambio climático persisten, se intensifican y aceleran, se deduce

que los impactos en la salud mental seguirán el mismo patrón (Hickman *et al.*, 2021).

Hoy sabemos que estos eventos provocan respuestas emocionales negativas, cuyas manifestaciones pueden ser agudas o crónicas. Las manifestaciones emocionales agudas suelen derivarse de catástrofes y desastres extremos, como huracanes o incendios, y se expresan a través de reacciones como el *shock*, el trauma o el estrés postraumático. En contraste, las manifestaciones emocionales crónicas son consecuencia de cambios graduales, como el aumento persistente de las temperaturas o la escasez de agua. Se expresan en incremento en el uso de servicios de emergencia de salud mental, sentimientos de impotencia o fatalismo, e incluso en conductas agresivas (Donoso-Sabando, 2021).

La salud mental es una dimensión crucial –aunque muchas veces invisible– de los impactos del cambio climático. En países como México aún no se cuenta con indicadores oficiales que midan estos efectos, pero un estudio sobre ansiedad climática en 10,000 adolescentes y jóvenes (entre 16 y 25 años) de diez países (Australia, Brasil, Estados Unidos, Finlandia, Francia, India, Nigeria, Filipinas, Portugal y Reino Unido) encontró que el 60 % se sentía “extremadamente” preocupado por el cambio climático y más del 45 % dijo que sus sentimientos sobre el cambio climático afectaban negativamente a su vida diaria (Hickman *et al.*, 2021). Las señales están ahí, cada vez más personas se sienten emocionalmente afectadas por la crisis ambiental, y cada vez es más evidente que los desafíos ecológicos son también desafíos afectivos.

En México, la Secretaría de Salud reportó que, entre enero y mayo del 2024, la ansiedad fue el principal motivo de atención en salud mental (51.5 %). Esto es muy relevante porque las personas que presentan ansiedad pueden tener una vulnerabilidad adicional y ser más propensas a manifestar ecoansiedad.

#### **ECOANSIEDAD Y OTRAS EMOCIONES CLIMÁTICAS: VIVIR EN UN MUNDO EN CRISIS**

La experiencia emocional del cambio climático es más compleja que una simple preocupación. En los

últimos años ha emergido el término *ecoansiedad*, definido como un miedo crónico ante el desastre ambiental. Clayton y colaboradores (2017) realizaron un estudio transversal con 1,000 participantes, y encontraron que la ansiedad climática difiere de la ansiedad general, es decir, se trata de entidades distintas, aunque relacionadas. Si bien no se trata de una categoría clínica formal, múltiples estudios han identificado que puede expresarse a través de alteraciones en el sueño e insomnio, pensamientos obsesivos o rumiantes relacionados con el cambio climático, ataques de pánico o una sensación constante de vulnerabilidad ante la crisis ecológica, manifestando también cierto grado de deterioro funcional y cognitivo (Hogg *et al.*, 2021). A pesar de lo anterior, la ecoansiedad no es patológica en sí misma: es una respuesta coherente a una realidad amenazante.

Aunque la ecoansiedad es la más común y descrita de las manifestaciones emocionales derivadas del cambio climático, las vivencias internas de las personas son complejas y puede existir una gama de emociones asociadas a este fenómeno (Marczak *et al.*, 2023). Marczak y colaboradores (2023) desarrollaron y validaron una escala que evalúa las respuestas emocionales relacionadas con el cambio climático, evidenciando que se presentan en una amplia gama y que a menudo están superpuestas: *ira climática*, al percibir la inacción de los líderes políticos; *impotencia climática*, ante la sensación de que nuestras acciones personales no bastan; o *desesperanza climática*, pesimismo e inseguridad por la percepción de que los efectos más catastróficos del cambio climático son inevitables.

La pregunta es: ¿cómo experimentamos estas emociones y qué hacemos con ellas? En muchos casos, la ecoansiedad puede motivar comportamientos proambientales, servir como mecanismo de afrontamiento e incluso generar sentido de comunidad (Schwartz *et al.*, 2023). Reconocer estas emociones no implica patologizarlas, sino integrarlas como parte del proceso humano de adaptación a un mundo cambiante.



© Miguel Ángel Andrade. De la serie *Xochipila*.

#### DE LA ANGUSTIA A LA ACCIÓN: CÓMO AFRONTAR LA CRISIS CLIMÁTICA

Ante un mundo en transformación ecológica acelerada, no basta con diagnosticar nuestras emociones climáticas: necesitamos estrategias para afrontarlas. Afrontar no significa ignorar el miedo, sino canalizarlo de forma adaptativa, construyendo respuestas que beneficien tanto a nuestro equilibrio interno como al entorno.

En términos psicológicos, existen dos grandes rutas de afrontamiento. La primera es *emocional*, centrada en regular el malestar que provocan situaciones percibidas como amenazantes. Aquí entran acciones como expresar lo que sentimos, reevaluar cognitivamente la situación o buscar apoyo social. La segunda es *conductual* o centrada en el problema, que busca modificar la causa del malestar. Adoptar comportamientos proambientales no solo tiene impacto en el entorno, sino también en la salud mental de quienes los ejercen. Sentirse parte activa del cambio reduce la sensación de impotencia y contribuye a la construcción de esperanza.

De acuerdo con Kurisi (2015), entre los comportamientos proambientales más inmediatos que podemos asumir, se encuentran:

- Comportamientos de conservación: reducir el consumo de recursos como agua y energía, reducir los residuos y usar menos envases.
- Comportamientos del consumidor: elegir productos ecológicos, reducir el consumo de carne y evitar los artículos desechables.
- Comportamientos de transporte: usar el transporte público, ir en bicicleta, caminar, conducir menos compartir coche y optar por vehículos eléctricos.
- Participación ciudadana: apoyar políticas ambientales, votar por candidatos ambientalistas y participar en el activismo ambiental.
- Custodia del territorio: cuidar y proteger el ambiente.

Los datos han sido claros: la crisis ecológica ya está dejando huellas profundas en nuestra salud física y mental. Vivir en un mundo en crisis climática nos exige reconocer la gravedad del problema y resistir emocionalmente a él. Esta dualidad puede ser compleja y difícil de gestionar. En este sentido, la presencia de ecoansiedad debe ser vista como una señal de alerta y el reflejo de una conciencia ecológica que evidencia nuestro vínculo con el planeta. Dentro de este malestar existe también una oportunidad de afrontarlo activamente, usarlo como una especie de motor para transformar las preocupaciones en acciones individuales y colectivas.



© Miguel Ángel Andrade. De la serie Xochipila.

La investigación indica que la participación en acciones climáticas, como pequeños gestos cotidianos, participación ciudadana y exigencias de justicia climática, reduce la ecoansiedad y puede ser considerada como un antídoto contra la impotencia y la desesperanza, no porque garantice un futuro seguro, sino porque la parálisis y la resignación son condiciones que ni el planeta ni nuestra salud mental pueden permitirse.

#### R E F E R E N C I A S

Clayton S, Manning CM, Krygsman K and Speiser M (2017). *Mental Health and Our Changing Climate: Impacts, Implications, and Guidance*. American Psychological Association, and ecoAmerica. Washington, D.C. <https://www.apa.org/news/press/releases/2017/03/mental-health-climate.pdf>.

Donoso-Sabando C (2021). Cambio climático: "salud mental en un mundo en llamas". *Mutatis Mutandis: Revista Internacional de Filosofía* 1,16:109-118. DOI: <https://doi.org/10.69967/07194773.v1i16.312>.

Intergovernmental Panel on Climate Change (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115. Recuperado de: [10.59327/IPCC/AR6-9789291691647](https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647).

Hartinger SM, Palmeiro-Silva YK, Llerena-Cayo C et al. (2024). The 2023 Latin America report of the Lancet Countdown on health and climate change: the imperative for health-centred climate-resilient development. *Lancet Regional Health-Americas* 33:100746. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.lana.2024.100746>.

Hickman C, Marks E, Pihkala P et al. (2021). Climate anxiety in children and young people and their beliefs about government responses to climate change: a global survey. *The Lancet Planetary Health* 5(12). DOI: [10.1016/S2542-5196\(21\)00278-3](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00278-3).

Hogg T, Stanley S, Obrien L et al. (2021). The Hogg Eco-Anxiety Scale: Development and Validation of a Multidimensional Scale. *Global Environmental Change*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102391>.

Kurisu K (2015). What Are Pro-Environmental Behaviors (PEBs)? In *Pro-environmental Behaviors*. Springer, Tokyo. (pp. 1-26). DOI: [https://doi.org/10.1007/978-4-431-55834-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-4-431-55834-7_1).

Marczak M, Wierzbá M, Zaremba D et al. (2023). Beyond climate anxiety: Development and validation of the inventory of climate emotions (ICE): A measure of multiple emotions experienced in relation to climate change. *Global Environmental Change* 83: 102764. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102764>.

Schwartz SEO, Benoit L, Clayton S et al. (2023). Climate change anxiety and mental health: Environmental activism as buffer. *Current Psychology* 28:1-14. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12144-022-02735-6>.

Secretaría de Salud (2024). *Observatorio Mexicano de Salud Mental y Adicciones. Informe sobre la situación de la salud mental y el consumo de sustancias en México*. Recuperado de: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/923815/INFORME\\_PAxS\\_2024.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/923815/INFORME_PAxS_2024.pdf).

**Libertad Paredes-Díaz**  
**Instituto de Investigaciones Biológicas**  
**Universidad Veracruzana**

**Yolanda Campos-Uscanga**  
**Instituto de Salud Pública**  
**Universidad Veracruzana**  
[ycampos@uv.mx](mailto:ycampos@uv.mx)

© Miguel Ángel Andrade. De la serie *Ofrenda Izta Andrade*.



# Cuando la concentración lo cambia todo: efecto dual del sulfuro de hidrógeno en el tratamiento del dolor neuropático

**Violeta Rangel-Galván**  
**Maricruz Rangel-Galván**

El sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ), además del óxido nítrico (NO) y el monóxido de carbono (CO), ha sido considerado por mucho tiempo como un contaminante tóxico para los seres vivos. Efectivamente, estos gases son nocivos para la salud e incluso pueden ser mortales en altas concentraciones durante una exposición prolongada. Por ejemplo, cuando la concentración de  $H_2S$  alcanza niveles altos, entre 150 y 250 partes por millón (ppm), puede causar una fuerte irritación en el aparato respiratorio e incluso generar un edema pulmonar. Con exposiciones a concentraciones más moderadas, por encima de las 30 ppm, aparecen síntomas como dolor de cabeza, náusea y vómito. En cambio, a concentraciones bajas, cercanas a 10 ppm, no se registran efectos metabólicos significativos (Liu *et al.*, 2022). Investigaciones recientes han demostrado que, a bajas concentraciones, el  $H_2S$  participa como regulador biológico en diversos procesos fisiológicos, tales como la señalización neuronal y la protección antioxidante. Una función notable es su participación como gasotransmisor, es decir, molécula gaseosa liposoluble producida internamente en el organismo, que actúa como neurotransmisor

y mediador de señales en canales iónicos y transportadores proteicos.

A diferencia de otros neurotransmisores o mensajeros celulares, los gasotransmisores se difunden libremente a través de las membranas celulares, sin necesidad de receptores específicos. Dentro de las funciones fisiológicas en las que participa el H<sub>2</sub>S están la diferenciación celular, la vasodilatación, la respuesta inflamatoria, así como la modulación de funciones cardíacas, endocrinas y respiratorias, entre otras. Las patologías en las que se ve involucrado el H<sub>2</sub>S incluyen la neurodegeneración, la inflamación y el dolor neuropático (Liu *et al.*, 2022; Rangel-Galván *et al.*, 2023). El dolor neuropático es de mucho interés, por lo que en las secciones posteriores expondremos los mecanismos moleculares involucrados en la vía de señalización CSE/H<sub>2</sub>S/Ca<sub>v</sub>3.2.

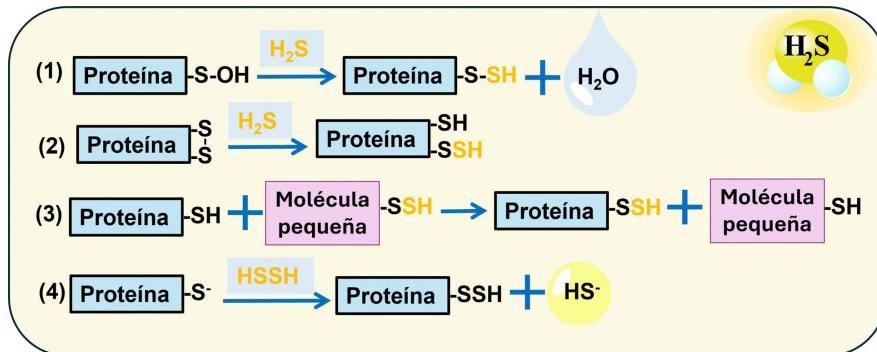
#### AZUFRE

Para comprender las propiedades del H<sub>2</sub>S, es importante entender algunos elementos de la química del azufre. El azufre (S) es uno de los componentes principales de los aminoácidos cisteína y metionina, así como de otras moléculas fundamentales en los seres vivos. El azufre se caracteriza por su variabilidad en los estados de oxidación, que van desde -2 hasta +6, lo que permite formar una amplia diversidad de compuestos químicos, tales como sulfuros (S<sup>2-</sup>), sulfitos (SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) y sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>). El estado de oxidación de -2 en el azufre es uno de los estados más comunes y significativos, ya que en este estado el azufre ha ganado dos electrones para alcanzar la configuración electrónica más estable, similar a la de un gas noble (Liu *et al.*, 2022). Algunos ejemplos comunes de sulfuros incluyen el sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), el sulfuro de sodio (Na<sub>2</sub>S) y el sulfuro de hierro (FeS). También se sabe que el H<sub>2</sub>S es uno de los productos generados durante la reducción (proceso donde una sustancia gana electrones) del azufre en la reacción química: S + H<sub>2</sub> → H<sub>2</sub>S (Olson y Straub, 2016).

#### EL SULFURO DE HIDRÓGENO EN LOS SISTEMAS BIOLÓGICOS

En los sistemas biológicos el medio acuoso está presente en casi todos los compartimentos celulares y extracelulares. Este estado es fundamental para disolver sustancias e indispensable para la mayoría de las reacciones bioquímicas. En este entorno, el H<sub>2</sub>S se disocia para formar iones de hidrógeno (H<sup>+</sup>) y aniones hidrosulfuro (HS<sup>-</sup>), generando también iones 2H<sup>+</sup> y S<sup>2-</sup>. De hecho, el H<sub>2</sub>S en condiciones fisiológicas (pH ~5–7.8 a 37 °C) se presenta principalmente en las siguientes formas: monoanión SH<sup>-</sup> (82 %), forma neutra H<sub>2</sub>S (18 %) y dianión S<sup>2-</sup> (en menos del 0.1 %) (Powell *et al.*, 2018). Medir con precisión el sulfuro de hidrógeno en tejidos y fluidos biológicos ha sido un reto. El método más usado consistía en atrapar el gas con zinc y luego transformarlo en azul de metileno para cuantificarlo con espectrofotometría. Con esta técnica se reportaron concentraciones entre 50 y 160 μM en cerebro y hasta 100 μM en suero de humano y de rata, valores que hoy sabemos que son altos porque el método no distinguía entre H<sub>2</sub>S libre y otras formas químicas relacionadas (HS<sup>-</sup> y S<sup>2-</sup>). Técnicas más actuales, como sondas selectivas o cromatografía, confirmaron cifras todavía altas (50–80 μM), pero el perfeccionamiento de los ensayos más recientes apunta a que las concentraciones reales son mucho menores, en el rango nanomolar (alrededor de 15 nM en cerebro e hígado de ratón), e incluso a niveles indetectables en plasma humano. Algo similar ocurrió con el óxido nítrico (NO): se pensaba que estaba en concentraciones micromolares, hasta que los biosensores demostraron que en realidad circula en apenas 1 a 5 nM (Li *et al.*, 2011).

Además, durante mucho tiempo se había pensado que el H<sub>2</sub>S se sintetiza y está presente permanentemente en la atmósfera, y que solo era metabolizado por algunos géneros de bacterias y arqueas. Sin embargo, estudios recientes han confirmado que los organismos eucariotas también sintetizan H<sub>2</sub>S. El H<sub>2</sub>S es producido en procesos endógenos de los mamíferos a partir de la L-cisteína, a través



**Figura 1.** Algunos mecanismos de sulfhidración de proteínas: En (1) la sulfhidración tiene lugar cuando los residuos de cisteína oxidados, como el ácido sulfénico (-SOH), reaccionan con el H<sub>2</sub>S. En (2) se muestra la reacción de H<sub>2</sub>S con los puentes disulfuro. En (3) se indica como la sulfhidración puede ocurrir también cuando una molécula pequeña, toda vez sulfhidratada, reacciona con grupos tiol en las cisteínas. En (4) se muestra la reacción de disulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S<sub>2</sub>) con grupos tiol de las cisteínas.

de cuatro rutas bioquímicas que involucran a las enzimas: a) cistationina-β-sintasa (CBS), b) cistationina-γ-lasa (CSE), c) cisteína aminotransferasa (CAT) con 3-mercaptopiruvato-sulfurtransferasa (3MST) y d) cisteína liasa (CL). Las enzimas CBS y CSE se ubican en el citosol celular, mientras que las enzimas CAT y 3MST se distribuyen tanto en la mitocondria como en el citosol. El funcionamiento de esta última enzima (3MST) depende del ion zinc. Otra vía de producción de H<sub>2</sub>S involucra mecanismos independientes de las enzimas, que incluyen polisulfuros (Sn<sup>2+</sup>) y persulfuros (R-SSH). El H<sub>2</sub>S, como gasotransmisor, media sus efectos a través de la formación de polisulfuros (Sn<sup>2+</sup>). Los polisulfuros son compuestos químicos que contienen múltiples átomos de azufre enlazados entre sí, formando cadenas unidas a otros elementos, generalmente metales o no metales como el sodio, el potasio o incluso el carbono que forma parte de los polímeros. El H<sub>2</sub>S se puede oxidar fácilmente, ya que tiene alta tendencia a perder electrones en una reacción química para formar los polisulfuros mencionados anteriormente, en este caso, el azufre tiene valencia cero (Olson y Straub, 2016).

Por otro lado, el H<sub>2</sub>S genera señales celulares para modificar residuos de cisteína en proteínas mediante un proceso llamado sulfhidración o persulfidración. Este cambio químico ocurre después de que la proteína ha sido sintetizada por la célula (modificación postraduccional), y dicho cambio es similar a la nitrosilación provocada por el óxido nítrico (NO). En lugar de formar grupos -SON (S-nitrosotiol) como el NO, el H<sub>2</sub>S convierte los grupos -SH (grupo tiol) de las cisteínas en grupos -SSH

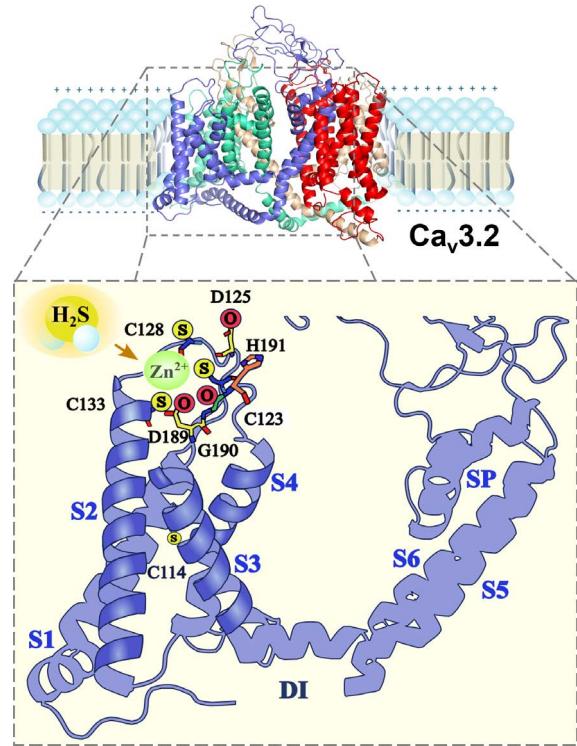
(persulfuros). Sin embargo, esta cisteína debe oxidarse antes de sufrir la modificación postraduccional con H<sub>2</sub>S, ya que el H<sub>2</sub>S no puede reaccionar directamente con tioles reducidos (compuestos orgánicos que contienen un grupo funcional -SH). La oxidación bajo condiciones fisiológicas puede generarse después de la liberación de especies reactivas de oxígeno (ROS), por ejemplo, después de una inflamación (Liu *et al.*, 2022).

La sulfhidración puede ocurrir de varias maneras: a) por medio de la interacción de H<sub>2</sub>S con residuos de cisteína oxidados, como los ácidos cisteína-sulfénicos (C-SOH) o disulfuros de cisteína (-S-S-), b) la reacción entre polisulfuros y grupos tiol de cisteína, o c) la interacción del disulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S<sub>2</sub>) con una cisteína que contiene un grupo tiol (Figura 1). La sulfhidración normalmente aumenta la reactividad del residuo de cisteína que está modificando, mientras que la nitrosilación, mediada por óxido nítrico (NO), disminuye su reactividad (Olson y Straub, 2016).

#### VÍA CSE/H<sub>2</sub>S/CAV3.2 EN EL DOLOR NEUROPÁTICO

El dolor neuropático es un tipo de dolor crónico que aparece cuando se produce una lesión o daño en los nervios encargados de transmitir las sensaciones al cerebro (sistema somatosensorial). Sus síntomas más característicos son la alodinia, es decir, sentir dolor ante estímulos que normalmente no lo causarían, y la hiperalgesia, un aumento desproporcionado en la sensibilidad al dolor. Hoy en día se

utilizan diferentes tratamientos, como anticonvulsivos, antidepresivos, inhibidores de la recaptación de serotonina y noradrenalina, e incluso opioides en algunos casos. Aunque estos medicamentos pueden aliviar los síntomas, suelen tardar en hacer efecto y llevan efectos secundarios, como somnolencia o riesgo de dependencia. Además, su eficacia es limitada: solo alrededor de la mitad de los pacientes experimenta un alivio significativo. Por ello, se vuelve cada vez más urgente investigar alternativas terapéuticas más seguras, específicas y eficaces (Finnerup *et al.*, 2020). En este contexto, una línea alternativa de investigación se centra en la vía CSE/H<sub>2</sub>S/Ca<sub>v</sub>3.2, que podría abrir nuevas posibilidades para el tratamiento del dolor neuropático. Esta vía inicia con la enzima CSE que produce el gas H<sub>2</sub>S, el cual puede favorecer la aparición de dolor neuropático al modular la actividad de las neuronas y la inflamación. Se ha visto que niveles elevados de H<sub>2</sub>S aumentan la excitabilidad de las neuronas sensoriales y potencian la señalización del dolor. Este gas también influye en la activación de distintos receptores y canales iónicos, como los receptores NMDA (N-metil-D-aspartato) y los receptores β-adrenérgicos, así como los canales iónicos de potasio K<sub>v</sub>2.1, los canales de potasio sensibles a calcio de alta conductancia (BK<sub>Ca</sub>), los receptores transitorios sensibles a los vanilloideos (TRPV) y los canales de calcio tipo L y tipo T (Li *et al.*, 2011). Entre estos receptores y canales iónicos, destaca el canal de calcio tipo T (Ca<sub>v</sub>3.2), considerado un blanco neural importante. Los Ca<sub>v</sub>3.2 participan en el dolor neuropático al aumentar la excitabilidad de las neuronas y favorecer la transmisión anormal de señales dolorosas. Estos canales iónicos se activan por cambios mínimos en el voltaje de membrana, permitiendo la entrada de calcio en las neuronas sensoriales, lo que puede causar hipersensibilidad y contribuir a la persistencia del dolor tras una lesión nerviosa (Rangel-Galván *et al.*, 2023). De esta manera, la alternativa terapéutica se centra en la inhibición de los canales Ca<sub>v</sub>3.2. Sin embargo, la interacción entre el H<sub>2</sub>S y los Ca<sub>v</sub>3.2



**Figura 2.** El canal de calcio tipo T (Ca<sub>v</sub>3.2) se forma de cuatro dominios representados en los colores azul (DI), verde (DII), beige (DIII) y rojo (DIV). Cada dominio se compone a su vez de seis segmentos transmembranales (S1-S6). En el acercamiento del dominio I se observa el sitio EMBS donde se localizan los residuos D189-G190-H191. La H191 interacciona con el H<sub>2</sub>S en conjunto con las cisteína C114, C123, C128 y C133 las cuales incrementan la afinidad con el íon Zn<sup>2+</sup> de acuerdo con la hipótesis de Elies *et al.*, 2014.

es compleja debido a que involucra mecanismos de interacción directos e indirectos, así como un efecto dual (aumento o disminución) de la corriente de calcio que depende de la concentración de H<sub>2</sub>S.

Cuando el H<sub>2</sub>S interacciona de manera directa con los canales Ca<sub>v</sub>3.2 lo hace a través de dos mecanismos principales: la sulfhidración y la modulación redox del canal (que altera el equilibrio de electrones en el canal). Aunque se ha demostrado que en los canales Ca<sub>v</sub>3.2 la sulfhidración no representa el mecanismo más importante, participa en la modificación de residuos de cisteína en este canal (Nelson *et al.*, 2005). La modulación redox del Ca<sub>v</sub>3.2 ocurre en el sitio de unión a metales extracelulares (EMBS), el cual tiene alta afinidad para iones divalentes como el zinc (Zn<sup>2+</sup>), el cobre (Cu<sup>2+</sup>) y el níquel (Ni<sup>2+</sup>) (Shuba, 2014). Cuando estos metales se unen al sitio EMBS, provocan un efecto a distancia, bloqueando a los canales Ca<sub>v</sub>3.2. Dentro de este sitio, un aminoácido en particular, la histidina

en la posición 191 (His191), resulta esencial. Lo interesante es que esta histidina es fundamental para la modulación del H<sub>2</sub>S en los canales Ca<sub>v</sub>3.2 y solo está presente en el subtipo Ca<sub>v</sub>3.2 y no en los otros canales de la misma familia (Ca<sub>v</sub>3.1 y Ca<sub>v</sub>3.3), lo que convierte a este mecanismo en un blanco altamente específico. Además, cisteínas cercanas (C114, C123, C128 y C133) pueden oxidarse, alterando el ambiente químico local y aumentando la afinidad por el zinc (Elies *et al.*, 2014). Esto favorece que el canal se inhiba, aunque el detalle de cuáles son las formas químicas más estables de esta oxidación, como la cisteína sulfínica (C-SO<sub>2</sub>H) o la sulfónica (C-SO<sub>3</sub>H), es un tema abierto de investigación. De hecho, aún se debate si el H<sub>2</sub>S libera el zinc de este sitio o, por el contrario, lo estabiliza, mostrando que el mecanismo aún no está del todo resuelto (Figura 2).

El dolor neuropático no solo depende de la acción directa del H<sub>2</sub>S sobre los canales iónicos, sino también de vías indirectas donde este gas interacciona con otros mensajeros químicos y moléculas de señalización. Entre ellos destacan los gasotransmisores como el óxido nítrico (NO) y el monóxido de carbono (CO). Cada uno de estos gasotransmisores pueden influir en la expresión y actividad de las enzimas que generan su biosíntesis. Esta interacción entre gases biológicos es conocida como *crosstalk*, y ocurre en condiciones patológicas que generan una sobreproducción simultánea de sus enzimas productoras y, por tanto, amplifican la señal del dolor. Otra pieza clave en el dolor neuropático son las citocinas inflamatorias, moléculas liberadas por la microglía (las células de defensa del sistema nervioso central). Una de ellas, la interleucina-6 (IL-6), activa una cadena de reacciones químicas dentro de la neurona que termina aumentando la cantidad de canales Ca<sub>v</sub>3.2, lo que facilita la transmisión del dolor. En contraste, el H<sub>2</sub>S puede ejercer un papel antiinflamatorio al reducir la producción de citocinas como la IL-6 cuando se activa la ruta antioxidante regulada por el factor Nrf2 (un “interruptor” que enciende los genes defensivos de la célula). El H<sub>2</sub>S también interfiere en la actividad de ciertas quinasas, que son enzimas encargadas

de añadir grupos fosfato a las proteínas para regular su función. Entre ellas están la PKG (proteína quinasa dependiente de GMPc), la PKC (proteína quinasa C) y la PKA (proteína quinasa A). Al modular estas enzimas, el H<sub>2</sub>S puede cambiar la intensidad de la señal de dolor. De hecho, se ha visto que compuestos que liberan lentamente H<sub>2</sub>S logran bloquear estas quinasas y, con ello, reducir los efectos del dolor neuropático en modelos animales (*in vivo*). Finalmente, la cantidad de canales Ca<sub>v</sub>3.2 expresados en la membrana celular no solo depende de cuántos se generen, sino también de cuántos se destruyen. Aquí interviene una enzima llamada USP5 (proteasa desubiquitinante 5), que evita que los canales Ca<sub>v</sub>3.2 sean degradados por la enzima proteasoma (el sistema de reciclaje de proteínas de la célula). De este modo, USP5 ayuda a mantener más canales activos y disponibles, lo que puede intensificar la señal dolorosa (Finnerup *et al.*, 2020; Rangel-Galván *et al.*, 2023).

En cuanto al efecto dual en la corriente de calcio del canal Ca<sub>v</sub>3.2, es decir, el aumento o la inhibición de la corriente de calcio dependiendo de la concentración de H<sub>2</sub>S, sigue siendo una pregunta abierta debido a las dificultades para medir las concentraciones de H<sub>2</sub>S en el organismo. De acuerdo con los valores fisiológicos de H<sub>2</sub>S mencionados con anterioridad, se establecieron rangos de concentración nanomolar, mientras que en los ensayos celulares muchas veces se aplican dosis en el rango milimolar, millones de veces más altas.

La causa principal de esta problemática está en la química del H<sub>2</sub>S debido a que es un gas muy inestable que se evapora, reacciona con metales y proteínas, y se consume rápidamente en los tejidos. Además, a pH fisiológico predomina en forma de HS<sup>-</sup> y no como H<sub>2</sub>S libre, lo que reduce aún más su disponibilidad. Por ello, los científicos deben emplear concentraciones mucho mayores para observar un efecto en sistemas experimentales. El resultado es que, en el laboratorio, el H<sub>2</sub>S puede mostrar comportamientos distintos a los que tendría en el cuerpo humano.

Canal	Modelo	Efecto del H <sub>2</sub> S	Concentración	Técnica	Donador de H <sub>2</sub> S
Tipo-T	Células HEK293	Inhibición	10 μM	<i>Patch-clamp</i>	NaHS
Tipo-T	DRG	Aumento	1.5 μM	<i>Patch-clamp</i>	NaHS
Tipo-L	H9c2 (Cardiomiocitos de rata)	Inhibición	10 μM	Imagen de calcio ( <i>Fura-2</i> )	NaHS
Tipo-L	Astrocitos	Aumento	200 μM	Imagen de calcio ( <i>Fura-2</i> )	NaHS
BK	hiPSC-MSC (células madre mesenquimales derivadas de células madre pluripotentes inducidas humanas)	Inhibición	100 μM	<i>Patch-clamp</i>	NaHS
BK	Células tumorales pituitarias de rata (GH3)	Aumento	300 μM	<i>Patch-clamp</i>	NaHS

**Tabla 1.** Efectos de la concentración del H<sub>2</sub>S en varios canales iónicos de calcio (modificada de Rangel-Galván *et al.*, 2023).

Con base en lo expuesto, podemos concluir que para estudiar el efecto dual del H<sub>2</sub>S en los canales de calcio Ca<sub>v</sub>3.2, los científicos deben utilizar técnicas muy precisas. Una de ellas es el registro electrofisiológico (*patch-clamp*), que permite medir las corrientes eléctricas que pasan a través de los canales iónicos de una célula, y otra es la imagen de calcio con el colorante Fura-2, que cambia de fluorescencia según la cantidad de calcio presente.

En estas condiciones de laboratorio se ha demostrado que cuando se aplica una dosis baja (10 μM) de NaHS, un donador químico que libera H<sub>2</sub>S, la corriente de calcio en los canales Ca<sub>v</sub>3.2 disminuye aproximadamente un 30 % en células HEK293 (una línea celular de laboratorio usada para experimentos) y cerca de un 18 % en neuronas sensoriales de los ganglios de la raíz dorsal (DRG) de la médula espinal (Ellies *et al.*, 2014). En cambio, cuando la dosis se eleva hasta 1.5 mM, ocurre lo contrario: la corriente de calcio aumenta en los canales Ca<sub>v</sub>3.2. Este efecto dual no es exclusivo de Ca<sub>v</sub>3.2, también se ha reportado en otros canales iónicos (ver Tabla 1), lo que sugiere que la concentración de H<sub>2</sub>S es un factor clave para determinar si actúa como un inhibidor o como un activador de corrientes iónicas (Rangel-Galván *et al.*, 2023).

En resumen, podemos concluir que el H<sub>2</sub>S es una molécula gaseosa producida por los organismos eucariotas, además de algunas bacterias y arqueas, a partir del azufre. A bajas concentraciones, el H<sub>2</sub>S participa como gasotransmisor con muchas funciones fisiológicas importantes, reguladas por un proceso conocido como sulfhidración. Este proceso es una modificación postraduccional que ocurre cuando el grupo persulfuro de las proteínas se une a una cisteína oxidada, provocando que el grupo tiol de la cisteína se transforme químicamente en un grupo persulfuro.

La participación del H<sub>2</sub>S en patologías relacionadas con el dolor neuropático resalta su importancia biomédica, planteando nuevos temas de investigación sobre los mecanismos moleculares asociados con la vía CSE/H<sub>2</sub>S/Ca<sub>v</sub>3.2. El efecto del H<sub>2</sub>S en el Ca<sub>v</sub>3.2 involucra interacciones directas a través del residuo His191, vías indirectas que involucran ciertos reguladores postraduccionales y efectos duales de activación o inhibición del canal Ca<sub>v</sub>3.2 dependientes de la concentración de H<sub>2</sub>S. Es importante mencionar que el estudio de esta vía está en proceso de investigación, ya que establecer las concentraciones adecuadas para aplicar en el tratamiento del dolor neuropático todavía es un reto que hay que afrontar antes de alcanzar las aplicaciones clínicas.



© Miguel Ángel Andrade. De la serie Ofrenda Izta Andrade.



© Miguel Ángel Andrade. De la serie Ofrenda Izta Andrade.

## R E F E R E N C I A S

Elies J, Scragg JL, Huang S et al. (2014). Hydrogen sulfide inhibits Ca<sub>3.2</sub> T-type Ca<sup>2+</sup> channels. *The FASEB Journal* 28(12): 5376-5387.

Finnerup NB, Kuner R and Jensen TS (2020). Neuropathic pain: from mechanisms to treatment. *Physiological Reviews* 101(1):259-301.

Li L, Rose P and Moore PK (2011). Hydrogen sulfide and cell signaling. *Annual Review of Pharmacology and Toxicology* 51(1):169-187.

Liu J, Mesfin FM, Hunter CE et al. (2022). Recent development of the molecular and cellular mechanisms of hydrogen sulfide gasotransmitter. *Antioxidants* 11(9):1788.

Nelson MT, Joksovic PM, Perez-Reyes E and Todorovic SM (2005). The endogenous redox agent L-cysteine induces T-type Ca<sup>2+</sup> channel-dependent sensitization of a novel subpopulation of rat peripheral nociceptors. *Journal of Neuroscience* 25(38):8766-8775.

Olson KR and Straub KD (2016). The role of hydrogen sulfide in evolution and the evolution of hydrogen sulfide in metabolism and signaling. *Physiology* 31(1):60-72.

Paul BD and Snyder SH (2015). H<sub>2</sub>S: a novel gasotransmitter that signals by sulphydrylation. *Trends in Biochemical Sciences* 40(11):687-700.

Powell C R, Dillon KM and Matson JB (2018). A review of hydrogen sulfide (H<sub>2</sub>S) donors: Chemistry and potential therapeutic applications. *Biochemical Pharmacology* 149:110-123.

Rangel-Galván M, Rangel-Galván V and Rangel-Huerta A (2023). T-type calcium channel modulation by hydrogen sulfide in neuropathic pain conditions. *Frontiers in Pharmacology* 14:1212800.

Shuba YM (2014). Models of calcium permeation through T-type channels. *Pflügers Archiv-European Journal of Physiology* 466:635-644.

**Violeta Rangel-Galván**  
**Facultad de Enfermería**  
**Complejo Regional Centro**  
**Benemérita Universidad Autónoma de Puebla**  
**Maricruz Rangel-Galván**  
**SECIHTI-Dirección de Innovación**  
**y Transferencia de Conocimiento**  
**Benemérita Universidad Autónoma de Puebla**  
[maricruz.rangelgalvan@viep.com.mx](mailto:maricruz.rangelgalvan@viep.com.mx)

© Miguel Ángel Andrade. De la serie Ofrenda Izta Andrade.



# Nrf2: un salvavidas celular

**Cinthia I. Landa-Moreno**  
**Francisco Alfredo Saavedra-Molina**

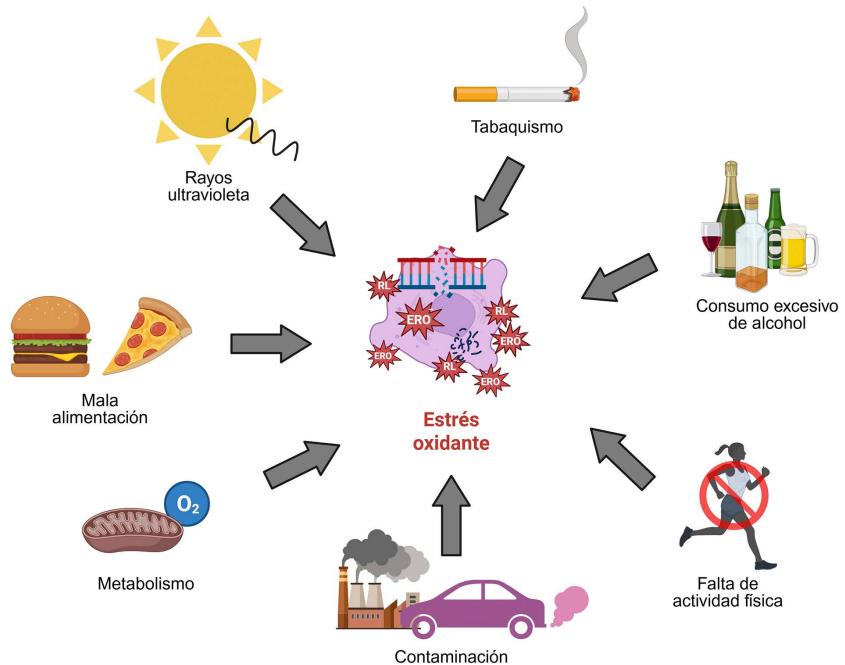
Los seres humanos dependemos del oxígeno para vivir, lo que nos define como organismos aeróbicos. Precisamente por esta dependencia, nuestras células, en su metabolismo normal, generan agentes oxidantes como especies reactivas de oxígeno (ERO) y radicales libres (RL). Las ERO y RL son moléculas inestables y altamente reactivas, capaces de reaccionar con otras moléculas de nuestras células provocando alteraciones en sus funciones (Aranda-Rivera *et al.*, 2022). Así mismo, además de la producción de ERO y RL por nuestro propio metabolismo dependiente de oxígeno, continuamente estamos expuestos a factores ambientales que pueden contribuir con la generación excesiva de ERO y RL en nuestras células, tales como los rayos solares ultravioleta, el humo del tabaco, el consumo excesivo de bebidas alcohólicas, la falta de actividad física, la mala alimentación y la contaminación (Ngo y Duennwald, 2022) (Figura 1). Sin embargo –y afortunadamente–, nuestro cuerpo cuenta con mecanismos de defensa ante esta situación: los antioxidantes. Los antioxidantes como su nombre lo indica, son moléculas que neutralizan y eliminan a las ERO y RL, protegiendo a la célula del daño oxidativo. Los antioxidantes pueden ser producidos propiamente por nuestra célula, o bien, podemos adquirirlos de la dieta; no obstante, su objetivo es el mismo, mantener el equilibrio celular (Demirci-Çekiç *et al.*, 2022).

Cuando el equilibrio celular se altera a favor de los RL y ERO se establece un estado de estrés oxidante (EO). El EO es un desbalance ocasionado por la formación excesiva de ERO y RL y, al mismo tiempo, una cantidad insuficiente de antioxidantes disponibles para eliminarlos (Demirci-Çekiç *et al.*, 2022). Las células pueden responder al EO y aumentar temporalmente la defensa antioxidante de nuestro cuerpo. Sin embargo, cuando el EO persiste, el sistema antioxidante se agota y pierde su eficacia.

Bajo esta condición, las ERO son capaces de atacar componentes celulares esenciales, como los lípidos de las membranas, las proteínas y el ADN, pudiendo causar daños perjudiciales e irreversibles. De hecho, numerosos estudios han demostrado que el EO prolongado está implicado en el desarrollo y progresión de enfermedades de alto impacto en salud pública a escala mundial, como el cáncer y la diabetes mellitus (Kowalczyk *et al.*, 2021). Sin embargo, es importante señalar que esta relación es compleja, y en ella parecen intervenir varios factores, por lo que continúa siendo objeto de investigación. Pero, ¿cómo es que la célula regula esta respuesta protectora ante el estrés oxidante? Pues bien, aquí es donde entra en juego una proteína muy importante, el factor Nrf2, considerado un regulador maestro de la defensa antioxidante.

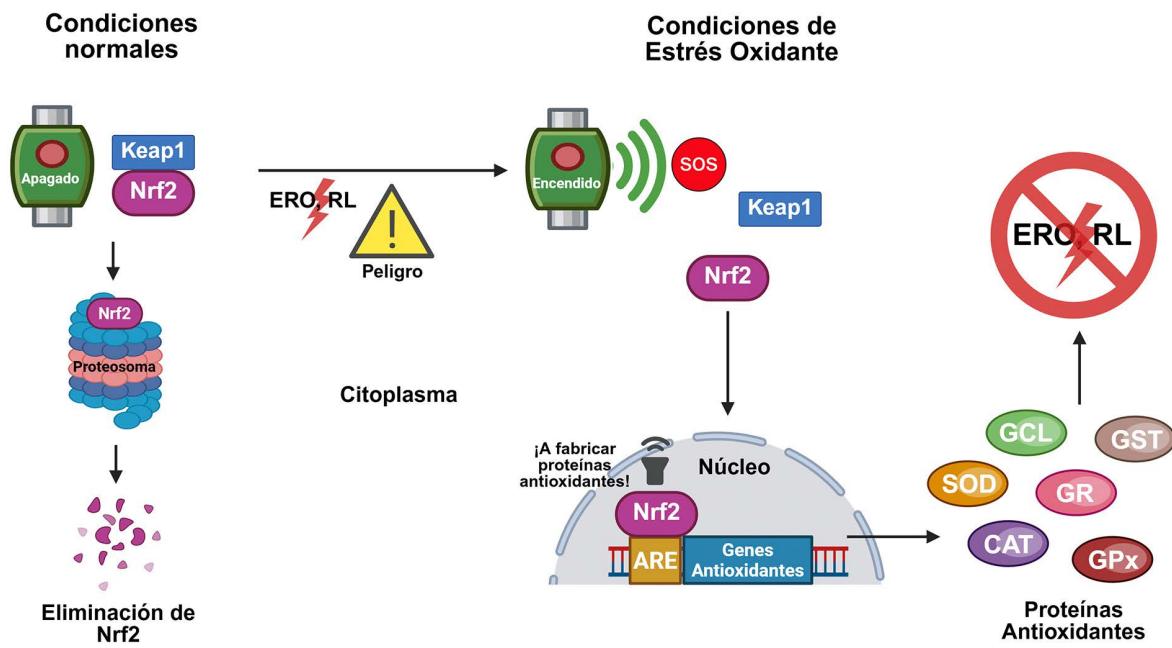
#### NRF2: INTERRUPTOR BIOLÓGICO DE EMERGENCIA

El factor Nrf2 es una proteína que en condiciones normales permanece inactiva dentro de nuestras células en el citoplasma. Esto ocurre porque la célula la elimina constantemente a través de un sistema de



**Figura 1.** Factores que contribuyen a la generación de especies reactivas de oxígeno (ERO) y radicales libres (RL) en la célula (creada con bioRender).

degradación celular llamado proteosoma, proceso que es regulado por otra proteína denominada Keap1, la cual se une a Nrf2 manteniéndolo inactivo y facilitando su eliminación. Es decir, el factor Nrf2 funciona como un “interruptor biológico de emergencia” que nuestras células mantienen apagado cuando todo funciona de manera normal. Sin embargo, cuando la célula detecta una señal de peligro como la exposición a agentes oxidantes, se activa dicho “interruptor”, lo que implica cambios en la estructura de Keap1 inducidas por las ERO y RL. Como consecuencia, Keap1, que bajo condiciones normales mantiene secuestrado a Nrf2, se inactiva y, por lo tanto, se propicia la liberación y la posterior activación de Nrf2. Además, se ha observado que el EO puede provocar la activación de otras vías dentro de la célula, en las que participan proteínas enzimáticas como algunas cinasas que, eventualmente, también terminan regulando al factor Nrf2 (He *et al.*, 2020). Finalmente, Nrf2 libre viaja desde el citoplasma hacia el núcleo de la célula en donde, en conjunto con otras moléculas, desencadena una respuesta celular protectora (He *et al.*, 2020) (Figura 2).



**Figura 2.** Nrf2 en condiciones normales y ante estímulos de estrés oxidante. Creado con biorender.com, consultado el 3 de junio de 2025.

### ¿CÓMO ES QUE EL FACTOR NRF2, UNA VEZ ACTIVO, PROTEGE A LA CÉLULA DEL EO?

Como se ha mencionado, el factor Nrf2 es una proteína fundamental que actúa como regulador maestro de la respuesta antioxidante en la célula. Su mecanismo de acción ocurre a nivel genético, modulando la producción de proteínas protectoras. Para comprender mejor la función del factor Nrf2, primero es necesario revisar brevemente cómo se producen las proteínas en la célula:

El proceso inicia en los genes, segmentos cortos y específicos de ADN situados en el núcleo de la célula, que contienen la información genética almacenada para la fabricación de proteínas. Cuando la célula requiere producir una proteína específica a partir de un gen determinado, se pone en marcha un proceso denominado transcripción, en el cual una enzima llamada ARN polimerasa II se une a la región promotora del gen. La región promotora de un gen es el sitio específico ubicado inmediatamente antes del comienzo de cada gen y actúa como una señal de reconocimiento para el inicio de la transcripción. Una vez unida la ARN polimerasa II a la región promotora del gen, copia la secuencia

específica de ADN a una molécula de ARN mensajero (ARNm). Posteriormente, después de una serie de modificaciones estructurales, el ARNm viaja desde el núcleo al citoplasma, en donde los ribosomas, estructuras celulares que funcionan como fábricas de proteínas, leen la información contenida en el ARNm mediante el código genético, para finalmente producir una proteína con funciones específicas. A esta última etapa se le conoce como traducción o síntesis de proteínas (Sharma, 2023).

¿Cuál es el papel del factor Nrf2 en todo esto? El mecanismo que revisamos anteriormente para poder producir una proteína específica a partir de un gen, no se lleva a cabo por sí solo, sino que requiere de moléculas que lo regulen. En este sentido, la proteína Nrf2 es un factor de transcripción, esto quiere decir que su función implica la regulación del proceso celular en el cual se copia un determinado gen a su ARN mensajero complementario (transcripción). De este modo, Nrf2 se une específicamente a la región promotora denominada "Elemento de Respuesta Antioxidante" (ARE) de numerosos genes. Esta unión permite el reclutamiento de distintas proteínas y moléculas

necesarias para dar inicio a la transcripción de dichos genes que, eventualmente, al ser traducidos en los ribosomas, darán lugar a diferentes proteínas con función antioxidante, protegiendo de esta manera a la célula del daño oxidativo ocasionado por las ERO y RL (He *et al.*, 2020) (Figura 2).

#### NRF2 Y PROTEÍNAS ANTIOXIDANTES

Las proteínas antioxidantes blanco del factor Nrf2 incluyen a la superóxido dismutasa (SOD), enzima que elimina al anión superóxido, un radical libre implicado en el desarrollo de múltiples enfermedades; la catalasa (CAT), enzima que neutraliza a la especie peróxido de hidrógeno, que puede dar lugar a otras moléculas altamente dañinas como el radical hidroxilo; la cisteína-glutamato ligasa (GCL), enzima implicada en la formación del principal antioxidante no enzimático de la célula: el glutatión, esencial para la actividad enzimática de otras proteínas antioxidantes y detoxificantes como la glutatión peroxidasa (GPx), la glutatión reductasa (GR) y la glutatión-S-transferasa (GST) (Ngo y Duennwald, 2022).

Todas estas proteínas antioxidantes reguladas por el factor Nrf2 cumplen una función protectora esencial en nuestras células al eliminar a las ERO y RL, ya que llevan a cabo reacciones químicas en donde convierten a estas especies potencialmente dañinas en compuestos estables e inofensivos para la célula. Su actividad coordinada preserva la estructura y función de los diferentes componentes celulares, previniendo así el daño asociado al EO.

#### NRF2, ¿AMIGO O ENEMIGO?

De acuerdo con diversas investigaciones, la activación del factor Nrf2 podría convertirse en un arma de doble filo para la salud. Es por ello que hoy en día existe un debate abierto dentro de la comunidad científica: ¿realmente el factor Nrf2 nos protege, o en ciertos escenarios juega en nuestra contra?

Esta discusión surge a raíz de que en algunos experimentos se ha observado que, en etapas avanzadas

de diferentes tipos de cáncer, el factor Nrf2 se encuentra activado de manera descontrolada. Esto ocurre porque bajo dicha condición, la proteína Keap1, que normalmente retiene al factor Nrf2, deja de funcionar, por lo que Nrf2 se activa de manera permanente y desenfrenada. Como resultado, Nrf2 estimula la producción de proteínas que protegen a las células cancerosas, lo que le permite impulsar el crecimiento del cáncer, su diseminación a otros órganos y, además, proporciona mayor resistencia a la quimioterapia (Wu *et al.*, 2019). Por este motivo, diversos estudios en modelos animales y en pacientes se centran hoy en la evaluación del bloqueo del factor Nrf2 en las etapas avanzadas del cáncer, con el propósito de mejorar la respuesta a la quimioterapia y disminuir la supervivencia de las células cancerosas (Wu *et al.*, 2019; Pouremamali *et al.*, 2022).

Por otro lado, en etapas tempranas de cáncer, el EO daña el ADN celular y afecta al sistema inmunológico de defensa, lo que favorece la progresión del tumor. Se ha observado que la activación del factor Nrf2 contrarresta dicho proceso al regular la respuesta antioxidante y mejorar la respuesta inmune, evitando que el cáncer siga avanzando (Wu *et al.*, 2019; Pouremamali *et al.*, 2022). Sin embargo, aún no está claro si dicha estrategia a largo plazo puede generar consecuencias negativas sobre células precancerosas o tumorales en etapas iniciales, por lo que se necesita de más estudios para descartar los posibles riesgos.

Numerosas investigaciones señalan que la disminución de la actividad del factor Nrf2, está vinculada con la aparición y el progreso de enfermedades como la diabetes mellitus, el Alzheimer y problemas cardíacos, así como un envejecimiento más acelerado y menos saludable (Leyane *et al.*, 2022). Esto sucede porque, al fallar este “interruptor” biológico de protección, las células pierden la capacidad de defenderse ante el EO, lo que ocasiona con el tiempo un mayor daño oxidativo a los diferentes tejidos y órganos, afectando significativamente la salud y el bienestar de las personas. De hecho, estudios realizados en animales y en humanos que padecen estas enfermedades, han mostrado que se produce una mejoría al recibir terapias dirigidas al

restablecimiento adecuado de la actividad de Nrf2 (Ngo y Duennwald, 2022).

Entonces, ¿es el factor Nrf2 un héroe o un villano? El papel de Nrf2 va a depender del entorno celular en el que se encuentre: durante las fases tempranas en células cancerosas, se ha visto que Nrf2 previene la progresión del tumor; en cambio, en etapas avanzadas, la activación descontrolada de Nrf2 puede resultar perjudicial. Por otra parte, en enfermedades crónico-degenerativas, la activación de Nrf2 ha mostrado ejercer un efecto protector, lo que previene la aparición de complicaciones.

#### **NRF2 Y SU REGULACIÓN POR COMPUESTOS NATURALES: LIMITACIONES CLÍNICAS**

Afortunadamente, la naturaleza nos ofrece una gran variedad de compuestos bioactivos capaces de modular la actividad de Nrf2.

Estudios recientes realizados en cultivos celulares y animales de experimentación, señalan que diversos compuestos químicos presentes en plantas medicinales y en alimentos de origen vegetal, como ácidos fenólicos, flavonoides, terpenoides y alcaloides actúan como potentes reguladores del factor Nrf2. Se ha descubierto que dichos compuestos pueden impulsar tanto la activación como el bloqueo de Nrf2, modulando así, de manera positiva o negativa, la producción de proteínas protectoras, y estableciendo una respuesta celular cuyo efecto va a depender del contexto y, por lo tanto, del enfoque terapéutico deseado.

Por otra parte, a pesar de los resultados prometedores que se han obtenido con los reguladores naturales de Nrf2 en estudios preclínicos, los ensayos realizados en humanos siguen siendo hasta el momento muy limitados, por lo que su uso en la práctica médica puede resultar apresurado. De hecho, ha sido necesaria la suspensión de varios estudios clínicos debido a la aparición de efectos adversos en pacientes tratados con compuestos reguladores de Nrf2.

Aunque se han producido importantes avances científicos para la comprensión de la doble función de Nrf2 y su regulación farmacológica con compuestos

de origen vegetal en distintas enfermedades relacionadas con el EO, aún queda mucha investigación por hacer para poder garantizar su seguridad y efectividad clínica (Pouremamali *et al.*, 2022; He *et al.*, 2023). No obstante, no cabe duda de que la regulación del factor Nrf2 presenta un gran potencial para convertirse en una terapia prometedora en el futuro, que actúe como un verdadero “salvavidas celular” en el manejo y prevención de diversas enfermedades.

#### **R E F E R E N C I A S**

- Aranda-Rivera AK, Cruz-Gregorio A, Arancibia-Hernández YL *et al.* (2022). RONS and oxidative stress: an overview of basic concepts. *Oxygen* 2(4):437-478.
- Demirci-Çekiç S, Özkan G, Avan AN *et al.* (2022). Biomarkers of oxidative stress and antioxidant defense. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis* 209:114477.
- He F, Ru X and Wen T (2020). Nrf2, a transcription factor for stress response and beyond. *International Journal of Molecular Sciences* 21(13):4777.
- He WJ, Lv CH, Chen Z *et al.* (2023). The regulatory effect of phytochemicals on chronic diseases by targeting Nrf2-ARE signaling pathway. *Antioxidants* 12(2):236.
- Kowalczyk P, Sulejczak D, Kleczkowska P *et al.* (2021). Mitochondrial oxidative stress-a causative factor and therapeutic target in many diseases. *International Journal of Molecular Sciences* 22(24):13384.
- Leyane TS, Jere SW and Hourelid NN (2022). Oxidative stress in ageing and chronic degenerative pathologies: molecular mechanisms involved in counteracting oxidative stress and chronic inflammation. *International Journal of Molecular Sciences* 23(13):7273.
- Ngo V and Duennwald ML (2022). Nrf2 and oxidative stress: A general overview of mechanisms and implications in human disease. *Antioxidants* 11(12):2345.
- Pouremamali F, Pouremamali A, Dadashpour M *et al.* (2022). An update on Nrf2 activators and inhibitors in cancer prevention and promotion. *Cell Communication and Signaling* 20(1):100.
- Sharma MG (2022). RNA transcription. In *Genetics Fundamentals Notes* (pp. 491-535). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Wu S, Lu H and Bai Y (2019). Nrf2 in cancers: A double-edged sword. *Cancer Medicine* (5):2252-67.
- Cinthia I. Landa-Moreno**  
**Francisco Alfredo Saavedra-Molina**  
**Instituto de Investigaciones Químico-Biológicas**  
**Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo**  
**1419561g@umich.mx**

© Miguel Ángel Andrade. De la serie Xochipila.



# Alternativas verdes contra los vectores de la enfermedad de Chagas

**José Rafael Delgado López  
Reyna Vargas-Abasolo**

La enfermedad de Chagas es una de las principales enfermedades parasitarias en América Latina. Es causada por el protozoo *Trypanosoma cruzi* y transmitida principalmente por chinches hematófagos de la subfamilia Triatominae. Estos vectores, comúnmente conocidos como "triatominos" o "chinches besuconas", representan una grave amenaza para la salud pública. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (2024), en América se reportan anualmente cerca de 30,000 casos nuevos de personas infectadas con *T. cruzi*.

El control convencional de los triatominos se basa en estrategias como la aplicación de insecticidas químicos (principalmente piretroides), la mejora de viviendas para reducir hábitats favorables y la vigilancia epidemiológica con participación comunitaria. Si bien, estos métodos han demostrado ser efectivos, resulta fundamental explorar otros enfoques innovadores y sostenibles. En este contexto, los aceites esenciales (AEs) se han perfilado como una alternativa prometedora para el control de triatominos domiciliados. Estos compuestos de origen vegetal pueden presentar propiedades insecticidas, repelentes u ovicidas. Por ejemplo, se ha observado que de las plantas *Amomyrtus meli*, *Peumus boldus* y *Senecio nutans* se pueden obtener AEs con efectos repelentes similares a los del conocido DEET (Dietilmetatoluamida) (Regnault-Roger

et al., 2012). Estos aceites no solo alejan a los insectos, sino que también actúan de forma más completa: interfieren con la alimentación y resultan tóxicos tanto para ninfas como para adultos de triatominos.

Los insecticidas botánicos han cobrado relevancia como alternativa sustentable al control convencional debido a sus múltiples ventajas. Por ejemplo, estos compuestos son biodegradables, generalmente tienen baja toxicidad en organismos no objetivo, y baja probabilidad de inducir resistencia en poblaciones de insectos (Pavela y Benelli, 2016). Además, la percepción pública positiva hacia las plantas, al ser consideradas fuentes naturales, ecológicas y seguras, refuerza su aceptación y uso potencial. En este sentido, los AEs podrían complementar las estrategias convencionales en el control de vectores y, con ello, disminuir los casos de enfermos de Chagas, al tiempo que se reducen los impactos ambientales y sanitarios asociados al uso prolongado de insecticidas químicos sintéticos.

#### DE LA PLANTA AL FRASCO: ¿CÓMO SE OBTIENEN LOS ACEITES ESENCIALES?

Los AEs son mezclas complejas de compuestos volátiles con propiedades aromáticas y bioactivas, extraídos de plantas mediante diferentes técnicas. Estos compuestos son metabolitos secundarios que, aunque no participan directamente en los procesos vitales de la planta, desempeñan funciones clave en su supervivencia. Por ejemplo, algunos metabolitos secundarios actúan como mecanismos de defensa ante depredadores, patógenos y otros organismos, y también en respuesta a factores abióticos como la sequía, la radiación o los cambios bruscos de temperatura. Cuando la planta percibe una amenaza o sufre daños, activa la producción y liberación de estos compuestos, que le permiten defenderse de forma natural.

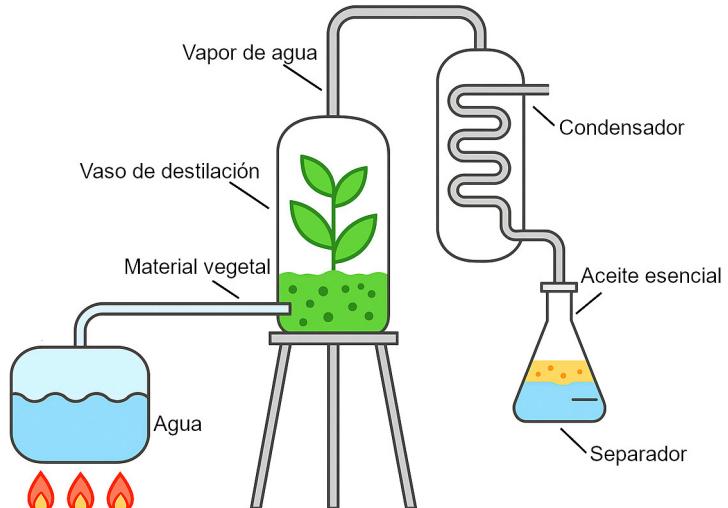


Figura 1. Esquema representativo de extracción de aceites esenciales por arrastre de vapor.

Los AEs se almacenan en distintas partes de la planta como hojas, flores, frutos, tallos y raíces, y se agrupan principalmente en las familias químicas de los terpenos y los fenoles. Existen varios métodos para extraerlos, y cada uno se elige según el tipo de planta y el compuesto que se busca. El más común es la destilación por arrastre de vapor, en la que el vapor de agua atraviesa el material vegetal y libera compuestos volátiles sin dañarlos. Estos vapores, que contienen tanto agua como aceites, se enfrián y se condensan, permitiendo la separación natural del aceite esencial puro y del hidrolato. Este proceso, sencillo pero delicado conserva la integridad de los compuestos aromáticos y es ampliamente utilizado en la obtención de extractos botánicos (Figura 1). Otro método es la extracción con solventes, ideal para flores delicadas como el jazmín, cuyos compuestos se perderían con el calor. También se utiliza la expresión en frío, donde el aceite se extrae directamente de la cáscara mediante presión (Figura 2).

La extracción con  $\text{CO}_2$  supercrítico es otra técnica avanzada que permite obtener aceites esenciales de alta pureza sin dejar residuos químicos. Se utiliza dióxido de carbono en condiciones de alta temperatura y presión, donde se comporta simultáneamente como gas y líquido, actuando como un disolvente selectivo. El  $\text{CO}_2$  penetra el material vegetal, disuelve los compuestos deseados y luego

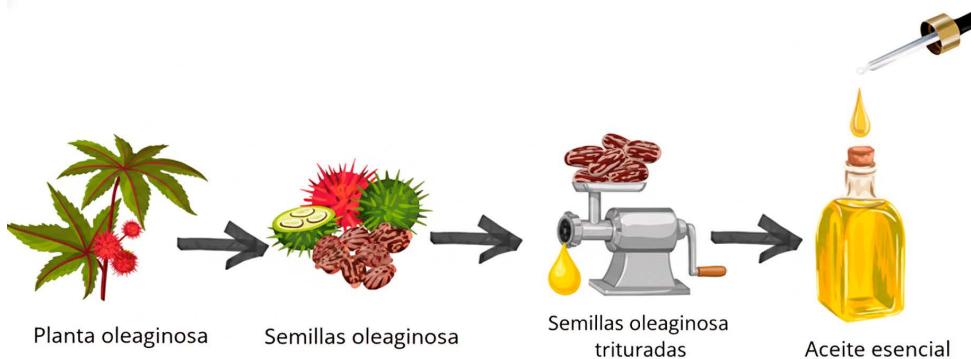


Figura 2. Representación de la extracción de aceite por medio de una prensa.

se separa fácilmente sin contaminar el producto final, lo que convierte a este método en una alternativa eficiente y ecológica frente a los solventes tradicionales (Figura 3).

#### DEL AROMA A LA ACCIÓN:

#### ¿CÓMO ACTÚAN LOS AES EN LAS CHINCHES BESUCONAS?

Los AEs, conocidos por su aroma y propiedades terapéuticas, han demostrado tener potencial para ser empleados como herramientas en el manejo de insectos vectores de enfermedades. Diversas investigaciones han revelado que estos compuestos naturales pueden actuar como insecticidas, causando efectos tóxicos, repelentes, atrayentes, agentes antialimentarios o reguladores del crecimiento de diferentes artrópodos. Estas propiedades permiten que los aceites esenciales afecten

el comportamiento y la fisiología de insectos de importancia médica, como los triatominos (Ahmed *et al.*, 2022). Entre los AEs que se han investigado, seleccionamos algunos de los más comunes, muchos de ellos extraídos de plantas que forman parte de nuestra vida cotidiana, como la lavanda, la menta o el eucalipto (ver Cuadro 1).

Estos aceites han sido objeto de diversos estudios en laboratorio, donde se ha demostrado su eficacia frente a distintas especies de chinches besuconas, entre las que se incluyen *Triatoma pallidipennis*, *Triatoma infestans* y *Rhodnius prolixus* (Sainz *et al.*, 2012; Rito-Rueda *et al.*, 2023; Vargas-Abasolo *et al.*, 2023).

Algunos AEs ejercen un efecto tóxico por contacto o ingestión. Estos compuestos pueden atravesar la cutícula del insecto o ser absorbidos durante la alimentación, interfiriendo con funciones vitales. Por ejemplo, la azadiractina, presente en el aceite de

neem (*Azadirachta indica*), inhibe la síntesis de quitina, una proteína clave para el desarrollo del exoesqueleto, afectando así el crecimiento y la muda de los insectos. Otros compuestos como el eugenol (presente en el aceite de clavo) y el eucaliptol (en el aceite de eucalipto) alteran la actividad del sistema nervioso, provocando hiperexcitación, parálisis y eventual muerte del insecto.

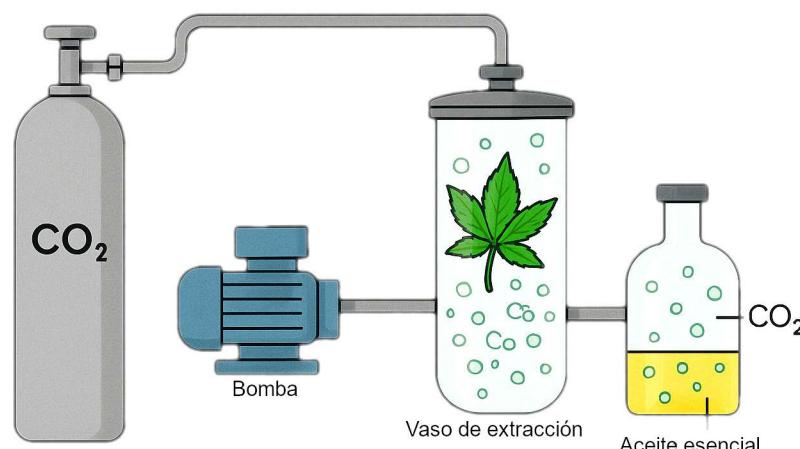


Figura 3. Extracción de aceite esencial con CO<sub>2</sub> supercrítico.

Nombre común	Nombre científico	Compuestos bioactivos	Efecto reportado
Ajenjo	<i>Artemisia absinthium</i>	Cis-epoxiyocimeno, crisantenol, 2,6-dimetil-5,7-octadien-2,3-diol, linalol, acetato de crisantenilo, cariofileno	Repelente
Ajo	<i>Allium sativum</i>	Alicina	Toxicidad por contacto y repelencia
Boldo	<i>Peumus boldus</i>	Ascaridol, m-cimeno, 1,8-cineol	Repelente
Canela	<i>Cinnamomum verum</i>	Cinamil acetato, trans-β-Cariofileno, trans-cinamaldeído	Inhibe la muda, repelente
Cempasúchil	<i>Tagetes spp.</i>	Estragol, dihidrotagetona y cis-tagetona	Repelente
Citronela	<i>Cymbopogon winterianus</i>	Geraniol, citronelol, limoneno, citronelal	Repelente y antialimentario
Chichón	<i>Zanthoxylum caribaeum</i>	Sesquiterpenos y monoterpenos	Toxicidad por contacto e ingestión
Clavo	<i>Syzygium aromaticum</i>	Eugenol	Toxicidad por contacto y repelencia
Eucalipto	<i>Eucalyptus globulus</i>	Eucaliptol	Toxicidad por contacto y repelencia
Flor amarilla	<i>Senecio nutans</i>	4-terpineol, cinamato de metilo, sabineno	Repelente
Laurel chino	<i>Laurelia sempervirens</i>	Cis-isosafrol, β-terpineno, trans-ocimeno, metileugenol	Repelente
Lavanda	<i>Lavandula spp.</i>	linalool y acetato de linalilo	Repelencia y toxicidad por contacto
Meli	<i>Amomyrtus meli</i>	α-farneseno, germacreno D, α-copaeno, β-cariofileno	Repelente
Menta	<i>Mentha arvensis</i>	Carvona, mentol, 1,8-cineol, mentona	Repelente
Naranjo	<i>Citrus sinensis</i>	α-pineno, limoneno	Toxicidad por contacto
Neem	<i>Azadirachta indica</i>	Azadiractina	Toxicidad por contacto e ingestión, repelencia, antialimentario y reducción de fecundidad
Peperina	<i>ippia sidoides</i>	Timol, carvacrol	Toxicidad por contacto y antialimentario
Tomillo	<i>Thymus vulgaris</i>	Timol, p-cimeno, c-terpineno, carvacrol, linalol	repelente
Zacate limón	<i>Cymbopogon flexuosus</i>	Citral (geranial + nerol)	Toxicidad por contacto

**Cuadro 1.** Aceites esenciales con propiedades insecticidas y repelentes sobre chinches besuconas.

Los aceites también afectan el comportamiento alimentario de los insectos al interferir con sus receptores gustativos y olfativos. Por ejemplo, el aceite de ajo (*Allium sativum*) contiene compuestos sulfurados que reducen la capacidad de las chinches para alimentarse de sangre. Además, se ha observado que ciertos AEs disminuyen la fecundidad de

las hembras y reducen la viabilidad de los huevos, afectando directamente la dinámica poblacional de estos vectores.

Uno de los mecanismos más aprovechados en el control vectorial es la repelencia (Figura 4). Esta se produce cuando los compuestos volátiles de los AEs saturan los receptores sensoriales de las antenas de los insectos, bloqueando su capacidad para detectar señales esenciales como el calor corporal,

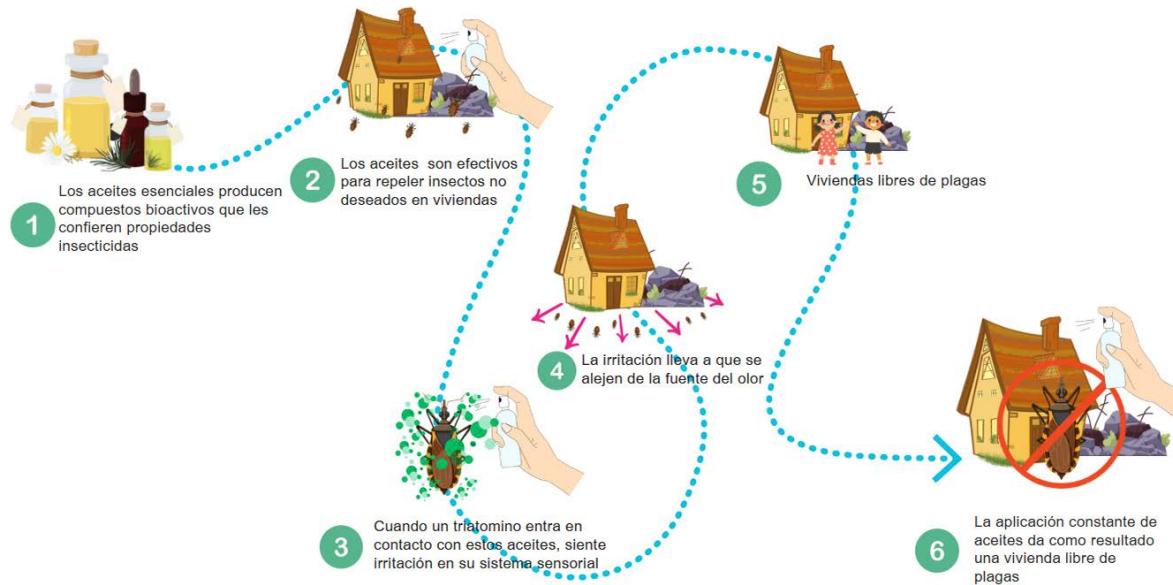


Figura 4. Esquema representativo de la aplicación de un aceite esencial con efecto repelente.

el dióxido de carbono o los compuestos presentes en el sudor humano. Sustancias como citronelal, linalool, carvacrol, carveol, citronelol, mentol,  $\alpha$ -terpineol, timol, verbenol y eugenol son especialmente eficaces en este aspecto. Por ejemplo, el aceite de citronela, reduce significativamente el acercamiento de los triatomos al hospedador, con lo que disminuye el riesgo de picadura.

#### LIMITACIONES Y NUEVAS ESTRATEGIAS

El empleo de AEs en el control de vectores representa oportunidades significativas, pero también enfrenta desafíos importantes que deben abordarse mediante investigación multidisciplinaria y desarrollo tecnológico. Por ejemplo, los AEs son muy volátiles, lo que implica una rápida evaporación y, por tanto, una acción residual limitada en el ambiente. Esto reduce su eficacia prolongada, especialmente en condiciones climáticas adversas. Para superar este obstáculo, la ciencia ha desarrollado nuevas estrategias como la encapsulación de los aceites en microcápsulas, nanocápsulas, ciclodextrinas, micelas poliméricas o hidrogeles. Estas tecnologías permiten una liberación controlada del compuesto activo y lo protegen de factores ambientales como la luz, el oxígeno y la temperatura, lo que puede prolongar su efecto biológico (Juica *et al.*, 2025).

Además, en diferentes estudios se ha explorado el uso combinado de aceites esenciales con insecticidas sintéticos, con el fin de potenciar su acción mediante un efecto sinérgico. Un caso destacado es la mezcla de eugenol y mentol con permetrina, que ha mostrado eficacia en el control de *T. infestans*, uno de los principales vectores de la enfermedad de Chagas (Reynoso *et al.*, 2023). Estas estrategias abren nuevas posibilidades para integrar los aceites esenciales en programas de manejo integrado de vectores, ofreciendo alternativas más sostenibles y efectivas.

No obstante, a pesar de que se ha demostrado la efectividad de los AEs para mitigar a los triatomos, los estudios se han realizado exclusivamente en condiciones de laboratorio. Para avanzar a su aplicación práctica es indispensable la validación de su efectividad en condiciones reales de campo. Además, se requiere de una evaluación rigurosa que considere la eficacia, estabilidad y seguridad de esta estrategia en el contexto operativo. De este modo, es fundamental diseñar formulaciones estables y de fácil aplicación que mantengan su eficacia bajo condiciones ambientales variables.

Una ventaja que tienen los AEs es que presentan menor toxicidad hacia organismos no objetivo, en comparación con los productos químicos sintéticos.

Sin embargo, su inocuidad en muchos casos ha sido asumida, más que demostrada, ya que hacen falta evaluaciones exhaustivas de sus efectos secundarios específicos en organismos no blanco. En este sentido, es fundamental establecer umbrales seguros de concentración y pautas de aplicación que minimicen impactos sobre la biodiversidad.

Finalmente, los AEs no están exentos del riesgo de generar resistencia cruzada, dado que algunas enzimas implicadas en la resistencia a insecticidas sintéticos pueden también inactivar compuestos de origen vegetal (Haddi *et al.*, 2023), lo que subraya la necesidad de una vigilancia constante y desarrollo de estrategias combinadas y de rotación.

#### HACIA UN CONTROL VECTORIAL MÁS SOSTENIBLE

La investigación de métodos biorracionales en el control de vectores debe enfocarse en la viabilidad operativa de estas estrategias. El diseño y validación de formulaciones botánicas más robustas, adaptadas a distintas condiciones ambientales, es esencial para su aplicación práctica. La seguridad de los métodos biorracionales sobre organismos no objetivo y su impacto ecológico deben ser continuamente evaluados. Además, la reducción de poblaciones de chinches vectoras, aunque beneficiosa para la salud pública, puede generar alteraciones ecológicas que deben anticiparse mediante estrategias de mitigación. Solo a través de un enfoque integral que combine efectividad biológica, sostenibilidad ambiental, viabilidad operativa y respaldo mediante políticas públicas, se podrá garantizar el éxito de estos métodos en el control racional contra los vectores de la enfermedad de Chagas.

Aprovechar el potencial bioactivo de las plantas para controlar los vectores de la enfermedad de Chagas abre nuevas posibilidades hacia un futuro en el que la salud humana y el respeto al ambiente puedan caminar de la mano. Con más investigación y desarrollo, los aceites esenciales podrían convertirse en una herramienta clave en la lucha contra una de las enfermedades olvidadas en América y el mundo.

#### AGRADECIMIENTO

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por la beca posdoctoral a RV-A.

#### N O T A

Este texto fue redactado por los autores, y se apoyó parcialmente en herramientas de inteligencia artificial (IA generativa) para la mejora del estilo y sugerencias gramaticales. Las ideas, interpretaciones, selección de información y conclusiones son responsabilidad exclusiva de los autores.

#### R E F E R E N C I A S

- Ahmed N, Alam M, Saeed M *et al.* (2022). Botanical insecticides are a non-toxic alternative to conventional pesticides in the control of insects and pests. *Global Decline of Insects* 103. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.100416>.
- Haddi K, Nauen R, Benelli G and Guedes RNC (2023). Global perspectives on insecticide resistance in agriculture and public health. *Entomologia Generalis* 43:495-500.
- Juica N, Bustos G, Devis S *et al.* (2025). Acaricidal activity of geraniol-loaded lignin nanoparticles for the control of *Brevipalpus chilensis*: an eco-friendly approach to crop protection. *Environmental Science: Nano*. DOI: <https://doi.org/10.1039/D5EN00155B>.
- Pavela R and Benelli G (2016) Essential oils as ecofriendly biopesticides? Challenges and constraints. *Trends in Plant Science* 21:1000-1007.
- Regnault-Roger C, Vincent C and Arnason JT (2012). Essential oils in insect control: Low-risk products in a high-stakes world. *Annual Review of Entomology* 57:405-424.
- Reynoso MN, Zerba EN and Alzogaray RA (2023). Eugenol and menthol synergize the toxicity of permethrin in the blood-sucking bug, *Triatoma infestans*. *Acta Tropica* 241:106900.
- Rito-Rueda A, Flores-Jiménez JE, Gutiérrez-Cabrera AE *et al.* (2024). How to repel a killer; chemical identification and effective repellent activity of commercial essential oils against kissing bugs. *Medical and Veterinary Entomology* 38:148-159.
- Sainz P, Sanz J, Burillo J *et al.* (2012). Essential oils for the control of reduviid insects. *Phytochemistry Reviews* 11:361-369.
- Vargas-Abasolo R, Gutiérrez-Cabrera AE, Cruz-López L *et al.* (2023). Chagas disease vector control strategies: where we are and where we should go from here. *Entomologia Generalis* 43:771-788.
- WHO (World Health Organization) (2024). Chagas disease (American trypanosomiasis). Recuperado de: [https://www.who.int/health-topics/chagas-disease#tab=tab\\_1](https://www.who.int/health-topics/chagas-disease#tab=tab_1).

**José Rafael Delgado López**  
*Universidad Tecnológica de la Selva, Chiapas*  
**Reyna Vargas-Abasolo**  
*Departamento de Ecología Evolutiva*  
*Instituto de Ecología*  
*Universidad Nacional Autónoma de México*  
[reynavargas.a@gmail.com](mailto:reynavargas.a@gmail.com)

# Germinados: una alternativa novedosa para el consumo de probióticos

**Luis Fernando Trujillo Castillo  
José Rodolfo Velázquez Martínez**

Actualmente existe un creciente interés de la población por el consumo de suplementos y otra clase de productos que consigan mejorar la salud de las personas. El temor de padecer alguna enfermedad crónico-degenerativa, como obesidad, diabetes, problemas del corazón e incluso cáncer, ha provocado que la gente, además de recurrir a los suplementos, también cambie sus hábitos alimentarios por una dieta más saludable que incluye suministros considerados como “superalimentos” (alimentos funcionales), que no solo nos proporcionan los nutrientes que necesitamos, sino que también mejoran nuestra salud en general (Ravi *et al.*, 2024). Entre estos alimentos, destacan los germinados y los alimentos fermentados que contienen probióticos.

Los germinados, que provienen de semillas, son una fuente increíble de nutrientes y tienen muchos beneficios para la salud. Contienen pocas calorías, menos elementos que pueden ser perjudiciales y están llenos de vitaminas, minerales, compuestos fenólicos y enzimas esenciales. Además, su sabor es mejor y son más fáciles de digerir, lo que los convierte en un excelente añadido a cualquier dieta.

Los probióticos son microorganismos vivos que, cuando se consumen en cantidades adecuadas, aportan beneficios para la salud. A menudo se les llama “bacterias buenas” o “amigables” porque ayudan a restaurar el equilibrio natural de las bacterias en el intestino, el cual puede verse

alterado por factores como los antibióticos o una mala alimentación. Sin embargo, existe un problema con los probióticos: cuando los consumimos, durante el proceso digestivo, una gran mayoría muere y no llega a su destino final, que es el colon. Por ello se han desarrollado métodos para que estos microorganismos puedan atravesar el tracto gastrointestinal y lleguen en la mayor cantidad posible a su destino. Uno de esos “transportes” son los germinados (Chávez García *et al.*, 2023).

Entender qué son los germinados y los probióticos, cómo funcionan y cuáles son sus beneficios es importante. Al profundizar en lo que cada uno ofrece, resulta evidente que combinarlos puede mejorar nuestra salud digestiva y bienestar general.

El objetivo de este ensayo es revelar el potencial de los brotes como un nuevo método para introducir probióticos en nuestra dieta y por qué esto es relevante en el contexto de nuestros hábitos alimentarios y las tendencias actuales de salud (Chávez García *et al.*, 2023).

## GERMINADOS

Las semillas germinadas, o granos germinados, son los brotes frescos que emergen de diferentes tipos de semillas en sus primeras etapas de crecimiento. Para lograr este proceso, generalmente se remojan las semillas en agua y se les permite desarrollarse durante un tiempo antes de consumirlas. La germinación es una forma sencilla y económica de enriquecer nutricionalmente cereales, legumbres, semillas oleaginosas y otras variedades utilizadas en la alimentación.

Cuando las semillas comienzan a germinar, su metabolismo se activa intensamente, generando cambios metabólicos beneficiosos. Este proceso desencadena la acción de diversas enzimas que facilitan la obtención de energía y la síntesis de compuestos útiles (Chávez García *et al.*, 2023).

Los granos y semillas actúan como reservorios de energía, almacenando moléculas de carbohidratos, proteínas y grasas que utilizan durante la germinación. En esta fase, las enzimas descomponen el almidón, las proteínas y los lípidos, produciendo azúcares

simples, ácidos grasos libres y aminoácidos. Además, se incrementa el contenido de vitaminas (especialmente C y del complejo B) y minerales (zinc, calcio, magnesio, potasio y hierro), lo que hace a los germinados más nutritivos que las semillas sin germinar.

El almidón, componente clave en los granos, determina sus propiedades funcionales y nutricionales. Durante la germinación, su estructura se modifica, variando según el tipo de cultivo y las condiciones ambientales. Las proteínas almacenadas se degradan para liberar aminoácidos y energía, mientras que los ácidos grasos, en particular el ácido oleico, pueden aumentar en los primeros días de germinación, dependiendo de la semilla y el entorno (Gawlik-Dziki *et al.*, 2021).

## GERMINADOS: BENEFICIOS PARA LA SALUD

Los germinados son una fuente de compuestos bioactivos. El proceso de germinación conduce a cambios en los componentes nutricionales de las semillas y granos germinados. Se ha puesto especial interés en los antioxidantes y polifenoles generados por este proceso, gracias a las actividades biológicas que exhiben. La germinación afecta el contenido total de polifenoles, terpenoides y glucosinolatos. Los estudios indican que estos compuestos se acumulan gradualmente en los germinados. En el caso de los fenoles, el principal precursor de la síntesis es la glucosa, de tal manera que una concentración elevada de glucosa en los germinados podría estar relacionada con el incremento de polifenoles (Gawlik-Dziki *et al.*, 2021). Un listado de estos compuestos y sus beneficios para la salud puede observarse en la Tabla 1.

Otros compuestos bioactivos encontrados en los germinados son el ácido gamma-aminobutírico (GABA, por sus siglas en inglés), la melatonina y el inositol.

El GABA es un neurotransmisor que regula la presión sanguínea, el ritmo cardíaco, el dolor y la ansiedad. Además, ha demostrado actividad antidiabética al ser un secretagogo (que estimula la liberación de otra sustancia) de la insulina en el páncreas.

La melatonina es la hormona involucrada en la regulación del ciclo circadiano, y el inositol es una coenzima que participa en la ruta de señalización de

Clase química	Subclase	Beneficios para la salud
Polifenoles	Flavonoides	Antioxidantes, antitumorales, anti-isquémicos, antialérgicos, antiinflamatorios.
	Ácidos fenólicos	Eliminador de radicales libres, neutralización del oxígeno en singlete, bloqueador de reacciones que provocan asma y alergias.
	Estilbenos	Antioxidantes, anticancerígenos, antitumorales; retardan el cáncer y la enfermedad cardiovascular; previenen la oxidación de las grasas y la formación de productos tóxicos de la oxidación.
	Fitoestrógenos	Por ejemplo, las isoflavonas y lignanos. Ayudan a prevenir los síntomas de la menopausia; presentan efectos antienvejecimiento de la piel; mejoran la formación ósea e incrementan la densidad mineral de los huesos; reducen la LDL, son anticancerígenos y antimutagénicos.
Terpenoides	Carotenoides	Neutralizadores químicos de las especies de oxígeno reactivas; reducen el riesgo de cáncer de próstata y la degeneración macular relacionada con la edad; estimulan al sistema inmune en las enfermedades inflamatorias o en enfermedades de inmunodeficiencia humanas.
	Tocotrienoles y tocoferoles	Retardan las lesiones por cáncer y los tumores; bloquean reacciones que producen radicales libres; eliminan radicales de la oxidación de lípidos y también neutralizan al oxígeno en singlete.
	Fitoesteroles	Reducen los niveles de colesterol; atenúan los procesos inflamatorios; inducen la apoptosis cuando se añaden a células cancerosas humanas cultivadas.
Metabolitos que contienen nitrógeno	Glucosinolatos	Protegen contra las infecciones por <i>Helicobacter pylori</i> , las lesiones traumáticas cerebrales, hemorragia cerebral, disminuyen el tamaño del infarto, edema cerebral; inhiben el crecimiento de células tumorales humanas, entre otros.

**Tabla 1.** Compuestos bioactivos y beneficios para la salud

la insulina y el transporte de la glucosa, siendo considerado un mediador en la secreción de insulina con un efecto antidiabético. Los granos y semillas muestran un incremento en el contenido de estos compuestos (Chávez García *et al.*, 2023).

Se ha demostrado que el proceso de germinación disminuye la concentración de antinutrientes en los brotes resultantes, lo cual ha sido ampliamente documentado en la literatura para diferentes especies. Los antinutrientes son todos aquellos compuestos o sustancias que interfieren negativamente con la absorción de otros nutrientes en la dieta, provocando una reducción en la ingesta, digestión y utilización de estos, así como la aparición de efectos adversos. De ahí la importancia de incluir los germinados en una dieta saludable para el ser humano (Dahiya y Nigam, 2022).

Una manera de introducir los germinados en la dieta puede ser consumirlos frescos o en ensaladas; estos se han vuelto populares en muchas recetas de alimentos. Los productos de panadería y los jugos son donde más se utilizan. Varios estudios han

mostrado que agregar germinados a los jugos vegetales puede ser beneficioso para personas con enfermedades crónicas como problemas cardíacos, diabetes tipo II y obesidad, ya que poseen propiedades saludables, entre ellas su capacidad antioxidante. También se han creado bebidas probióticas no lácteas a base de germinados, que tienen un sabor agradable y contribuyen al aporte de microorganismos beneficiosos para nuestro intestino. Las harinas de diferentes semillas y granos germinados han demostrado tener propiedades antiinflamatorias y antioxidantes, aunque todavía se requiere investigar más sobre cómo pueden incorporarse en otros productos (Dahiya y Nigam, 2022).

## PROBIÓTICOS

Los probióticos son microorganismos vivos que, al consumirse en las cantidades adecuadas, pueden

resultar muy beneficiosos para la salud. Actualmente, se encuentran disponibles en una gran variedad de productos lácteos y no lácteos fermentados, así como en forma de cápsulas y bebidas probióticas, entre otros formatos.

Entre los múltiples beneficios de los probióticos destacan su eficacia para diversos problemas intestinales –como han demostrado estudios recientes–, su capacidad para proteger contra microorganismos patógenos, el fortalecimiento del sistema inmunológico y posibles efectos preventivos contra algunos tipos de cáncer, lo cual aún se sigue debatiendo (Vera-Santander *et al.*, 2023). Estos microorganismos ejercen su acción beneficiosa mediante la producción de metabolitos, la inhibición del establecimiento de patógenos y el refuerzo de la inmunidad tanto innata como adaptativa. Además, su consumo es seguro, lo que ha contribuido a su popularidad en diversas presentaciones (Maldonado Galeano *et al.*, 2019).

La Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) de los Estados Unidos ha aprobado el uso de ciertas bacterias como lactobacilos, lactococos y bifidobacterias, clasificándolas como seguras (denominación GRAS, del inglés “Generally Recognized As Safe”). Esto permite su incorporación en alimentos sin restricciones. En términos generales, una cepa probiótica se considera segura cuando carece de factores de virulencia y no presenta resistencia a antibióticos, tanto para humanos como para animales (Maldonado Galeano *et al.*, 2019).a

#### **PROBIÓTICOS: BENEFICIOS PARA LA SALUD**

Muchas personas en todo el mundo consumen probióticos diariamente debido a los ampliamente difundidos beneficios para la salud, lo que ha impulsado la expansión del mercado de estos productos. Al evaluar su seguridad, se consideran diversos factores: la ausencia de enfermedades asociadas (como endocarditis o bacteriemia), la no transferencia de genes de resistencia a antibióticos en la flora intestinal y la inexistencia de efectos metabólicos o tóxicos en el sistema digestivo (Vera-Santander *et al.*, 2023).

Se ha demostrado ampliamente la utilidad de los probióticos para aliviar diversos trastornos intestinales. Numerosos estudios, incluyendo ensayos clínicos e investigaciones en modelos animales, respaldan su eficacia en condiciones como enterocolitis necrotizante, diarrea asociada a antibióticos, ciertas alergias infantiles, prevención y tratamiento de gastroenteritis viral aguda, así como en enfermedad inflamatoria intestinal (EII) (Cruchet *et al.*, 2015).

Uno de los principales mecanismos por los cuales los probióticos reducen los síntomas de trastornos intestinales es mediante el incremento en la producción de ácidos grasos de cadena corta (AGCC) en el colon. Este proceso disminuye la permeabilidad intestinal y previene la entrada de microorganismos patógenos (Markowiak-Kopeć y Śliżewska, 2020).

Además, los probióticos modulan diversas vías de señalización inmunológica, representando una de sus funciones más destacables. También desempeñan un papel crucial en la regulación de la función de células epiteliales, células asesinas naturales y células dendríticas (Maldonado *et al.*, 2019).

#### **FORMAS DE CONSUMO DE PROBIÓTICOS**

Los probióticos, como *Lactobacillus* y *Bifidobacterium*, se incorporan a los alimentos durante el proceso de fermentación. La supervivencia prolongada de los probióticos en los alimentos ha generado cambios en la funcionalidad y eficacia de los productos, como la liberación de componentes bioactivos. Por ejemplo, se ha observado que los probióticos liberan péptidos inhibidores de la enzima convertidora de angiotensina en la leche y el queso, lo que ejerce un efecto antihipertensivo.

Los productos lácteos tradicionalmente han sido los principales vehículos para los probióticos, aunque actualmente se utilizan cada vez más productos no lácteos. Existen diversas aplicaciones innovadoras centradas en la fermentación de soya, cereales, verduras, frutas, jugos de frutas y carne. Se están desarrollando nuevos productos que sirven como portadores de probióticos, junto con esfuerzos para mejorar el crecimiento y la supervivencia de estos microorganismos en los productos alimenticios (Vera Santander *et al.*, 2023).

Es necesario recurrir a diferentes alternativas (cápsulas, viales, etc.) para garantizar que los probióticos lleguen en cantidades adecuadas al colon y, además, potencien su efecto benéfico para la salud, es decir, que cumplan una función simbiótica. Una de estas nuevas matrices que está ganando relevancia son los germinados.

Los complementos dietéticos probióticos proporcionan beneficios para la salud mediante su interacción con los alimentos. Además, es fundamental que las bacterias probióticas se mantengan viables en los complementos en cantidades suficientes y que sobrevivan a las condiciones adversas del tracto gastrointestinal. Se ha sugerido que la naturaleza del vehículo alimentario podría afectar la estabilidad de los microorganismos probióticos durante su tránsito gastrointestinal (Wolfe *et al.*, 2023).

#### **SIMBIOSIS GERMINADOS-PROBIÓTICOS**

En la actualidad, las personas están muy enfocadas en cuidar su salud y recurren al uso de probióticos. Se ha observado que estos microorganismos pueden mejorar tanto la calidad de los alimentos como su sabor, por lo que se han incorporado a diversos productos como verduras, bebidas fermentadas, carnes y productos lácteos para su consumo. Además, se han desarrollado nuevas formas de incluir probióticos en la dieta. Una de estas opciones es su ingesta en forma de suplementos, como cápsulas. Sin embargo, estos vehículos no solo protegen a los probióticos durante su paso por las condiciones adversas del tracto intestinal, sino que también buscan potenciar su efecto como beneficio adicional para la salud humana.

Entre estos nuevos transportadores se encuentran los germinados, que a través de una relación simbiótica con los probióticos son ahora considerados alimentos funcionales, ya que además de contener probióticos, aportan prebióticos como fibra dietética, fructooligosacáridos y almidón resistente, compuestos vitales para la salud intestinal (Gawlik-Dziki *et al.*, 2021).

En la fase de imbibición, las semillas absorben microorganismos probióticos, lo que les brinda un mejor acceso a los nutrientes necesarios para su crecimiento. Factores como la temperatura de germinación, el

método de inoculación y el tipo de semilla desempeñan un papel clave en la producción eficiente de brotes ricos en probióticos. Estos brotes pueden utilizarse para elaborar alimentos funcionales, lo que contribuye a una mejor digestibilidad de los nutrientes y mejora la calidad microbiológica de los germinados (Swieca *et al.*, 2019).

Durante la germinación, los granos y semillas activan una intensa actividad enzimática que da lugar a transformaciones metabólicas clave: proteínas, almidones y lípidos se hidrolizan en azúcares simples, aminoácidos libres y ácidos grasos, acompañados de un significativo incremento en compuestos bioactivos como antioxidantes y flavonoides. Estos metabolitos no solo mejoran la digestibilidad, sino que también actúan como agentes protectores naturales frente al estrés gastrointestinal. En particular, fibras solubles como betaglucanos y arabinoxilanos, presentes en germinados, funcionan como matrices físicas y prebióticas que favorecen la adhesión microbiana de cepas probióticas y minimizan la exposición al pH ácido gástrico durante la digestión. Además, se ha observado que esta matriz vegetal actúa como una forma de encapsulación natural: los probióticos se adhieren o incluso forman biofilms sobre las superficies de los germinados, lo cual mejora considerablemente su viabilidad durante el tránsito gastrointestinal simulado (Chávez García *et al.*, 2023).

Al comparar brotes con y sin probióticos, aquellos que los contienen presentan mayores concentraciones de proteínas, aminoácidos, péptidos y almidón resistente; esto no solo representa un valor agregado nutricional, sino que también fortalece la relación simbiótica entre ambos (Gawlik-Dziki *et al.*, 2021).

Algunas cepas probióticas ampliamente utilizadas en la bioestimulación de los germinados, y que son un ejemplo de esta relación simbiótica, son las del género *Bifidobacterium*, como *Bifidobacterium lactis*, *Bifidobacterium longum*, y del género *Lactobacillus* con cepas como *Lacticaseibacillus rhamnosus*, *Lactiplantibacillus plantarum* y *Lactobacillus acidophilus* entre otros (Markowiak-Kopec P y Sliwowska, 2020; Dahiya y Nigam, 2022).



## CONCLUSIONES

Hoy en día, muchas enfermedades relacionadas con malos hábitos alimenticios y la falta de acceso a comida saludable han impulsado el desarrollo de alimentos funcionales que ayuden a prevenir estos problemas de salud. Se ha investigado sobre diferentes tipos de alimentos que pueden transportar probióticos, pero no todos resisten las condiciones del sistema digestivo. Los germinados son considerados un alimento funcional porque, al ser tratados con microorganismos probióticos durante su remojo, demuestran ser excelentes portadores de estos probióticos y logran sobrevivir a las adversas condiciones del tracto digestivo. Además, contribuyen a incrementar los compuestos beneficiosos y mejoran la absorción de nutrientes cuando son consumidos (Chávez García *et al.*, 2023).

## R E F E R E N C I A S

Chávez García SN, Rodríguez-Herrera R, Nery Flores S *et al.* (2023). Sprouts as probiotic carriers: A new trend to improve consumer nutrition. *Food Chemistry: Molecular Sciences* 7:100185.

Cruchet S, Furnes R, Maruy A *et al.* (2015). The use of probiotics in pediatric gastroenterology: a review of the literature and recommendations by Latin-American experts. *Pediatric Drugs* 17:199-216.

Dahiya D and Nigam PS (2022). Nutrition and health through the use of probiotic strains in fermentation to produce non-dairy functional beverage products supporting gut microbiota. *Foods* 11(18):2760.

Gawlik-Dziki U, Baraniak B, Sikora M *et al.* (2021). Potentially bioaccessible phenolic and antioxidant potential of fresh and stored lentil sprouts-Effect of *Lactobacillus plantarum* 299v enrichment. *Molecules* 26(8):210.

Maldonado Galdeano C, Cazorla SI, Lemme Dumit JM *et al.* (2019). Beneficial effects of probiotic consumption on the immune system. *Annals of Nutrition and Metabolism* 74(2):115-124.

Markowiak-Kopec P and Sliwowska K (2020). The effect of probiotics on the production of short-chain fatty acids by human intestinal microbiome. *Nutrients* 12(4):1107.

Ravi KM, Raghav M, Vikram S and Priyank P (2024). Bioactive exploration in functional foods: Unlocking nature's treasures. *Current Pharmaceutical Biotechnology* 25(11):1419-1435.

Swieca M, Kordowska-Wiater M, Pytka M *et al.* (2019). Nutritional and pro-health quality of lentil and adzuki bean sprouts enriched with probiotic yeast *Saccharomyces cerevisiae* var. *Boulardii*. *LWT* 100:220-226.

Vera-Santander VE, Hernández-Figueroa RH, Jiménez-Munguía MT *et al.* (2023). Health benefits of consuming foods with bacterial probiotics, postbiotics, and their metabolites: A Review. *Molecules* 28(3):1230.

Wolfe W, Xiang Z, Yu X *et al.* (2023). The challenge of applications of probiotics in gastrointestinal diseases. *Advanced Gut & Microbiome Research* 2023:1-10.

**Luis Fernando Trujillo Castillo**  
**José Rodolfo Velázquez Martínez**  
**Universidad Juárez Autónoma de Tabasco**  
**División Académica de Ciencias Agropecuarias**  
**[fernando.trujillo@ujat.mx](mailto:fernando.trujillo@ujat.mx)**

# Contaminación ambiental y bioindicadores

Irene Romero-Nájera

El deterioro ambiental, junto con los problemas de salud a los que nos enfrentamos constantemente, nos hace recapacitar sobre el efecto que generan las actividades humanas en el entorno, el cual puede ser positivo o negativo. Desgraciadamente, los negativos suelen ser más comunes. Algunos de los métodos para estudiar dichos efectos incluyen experimentos de laboratorio, el uso de programas matemáticos y estadísticos para hacer predicciones a través de simulaciones, los análisis físicos, químicos y biológicos realizados a muestras tomadas en campo, así como, de manera indirecta, el estudio de organismos bioindicadores.

La alteración o modificación causada por una acción humana sobre el medio (aire, agua o suelo) es conocida como impacto antropogénico. La contaminación ambiental es un ejemplo de alteración negativa directa que puede afectar a cualquiera de los tres medios en los que habitan los seres vivos.

## CONTAMINACIÓN EN EL AIRE

Cada vez es más común observar la incidencia de enfermedades respiratorias como asma, bronquitis y enfisema pulmonar, que tienen que ver con la calidad del aire. La concentración de partículas atmosféricas y la presencia de contaminantes como el ozono y el dióxido de nitrógeno han sido los principales culpables. Así, los elementos nocivos se

dirigen hacia el sistema respiratorio; muchos de ellos se quedan alojados en los pulmones o en las mucosas. Para poder expulsarlos, se producen ataques de tos y lagrimeo, lo que dificulta la inhalación de oxígeno.

En aquellos países en los que se viven inviernos crudos, como es el caso de Chile, resulta necesario utilizar leña para calentar las habitaciones. La quema de los troncos hace que el ambiente se llene de partículas que se dispersan con el humo y no pueden salir, se quedan encerradas junto con las personas. El resultado es inhalar aire con restos de polvo y hollín, que tarde o temprano le pasarán factura a la salud. Es justamente en la estación invernal en la que hay un mayor ingreso a hospitales por afecciones respiratorias. Desgraciadamente, los niños menores de 15 años han sido los más afectados (Jiménez *et al.*, 2024).

#### **CONTAMINACIÓN ACUÁTICA**

En cuanto a la contaminación del agua tenemos, por ejemplo, que cuando hay derrames de petróleo en el mar, tanto peces, como aves, mamíferos e invertebrados marinos sufren las consecuencias directamente. Se ha reportado que sus poblaciones podrían llegar a disminuir drásticamente, ya sea porque busquen nuevos sitios donde las condiciones sean más favorables o, incluso, en casos extremos, porque desaparecen del planeta. Tal es el caso de varias especies de invertebrados (que carecen de columna vertebral) marinos, a los que se les dificulta moverse de un sitio a otro, como los erizos y las estrellas de mar. Y bueno, para aquellos que son sedentarios (que no se pueden mover), como los corales y las anémonas, es una tarea imposible de realizar (Pulido Capurro *et al.*, 2022). Además, el agua contaminada con agroquímicos derivados de suelos cultivados puede ser lixiviada (infiltada) a los mantos freáticos y a los sistemas lagunares que desembocan en el mar, lo que afectará la calidad del agua para consumo humano, así como a la diversidad de especies acuáticas que habitan en esas zonas (Sierra-Cortés *et al.*, 2019, Jáquez-Matas *et al.*, 2022).

Un ejemplo de ello es haber encontrado plaguicidas en tejido de delfines y de manatíes en el Golfo de México, lo que podría ocasionar alteraciones reproductivas y enfermedades de distinta índole (Flores Sánchez *et al.*, 2018), que se sumarían a las causas que ponen en peligro su existencia.

#### **CONTAMINACIÓN EN EL SUELO**

Ahora, sobre los organismos terrestres, existen varias plantas que se cultivan en el campo como el maíz, la alfalfa y el nogal, que bioacumulan (incorporar a sus tejidos) sustancias tóxicas, ya sea de los plaguicidas, de la contaminación del suelo en el que se siembran o del agua con que se riegan (Jáquez-Matas *et al.*, 2022). Tanto las plantas que cultivamos como los organismos que consumimos son capaces de bioacumular sustancias tóxicas que se irán pasando a través de las cadenas alimenticias desde los niveles inferiores hasta los más altos, donde se encuentra precisamente el ser humano, lo que puede provocar un riesgo a la salud. Se sabe que mientras más grande es el organismo, mayor cantidad de sustancias podrá incorporar a sus tejidos, por lo que un charal, en comparación con un atún, contendrá una menor cantidad de elementos nocivos, como el mercurio (Romero Nájera 2024).

Vemos que las implicaciones son graves y que hay que actuar lo más rápido posible para revertirlas, detenerlas, modificarlas o reducirlas, ya que habrá casos en los que remediarlas sea imposible. Los estudios que se llevan a cabo para determinar el grado de daño ambiental pueden ser a través de experimentos de laboratorio, de simulaciones, de análisis de muestras de campo o, de manera indirecta, por medio del estudio de organismos bioindicadores.

#### **ORGANISMOS INDICADORES DE LA CALIDAD AMBIENTAL**

Los organismos cuya ausencia o presencia nos indica la calidad de un sitio se conocen como bioindicadores. Son seres vivos sensibles a pequeñas modificaciones en su ambiente que pueden reaccionar de distintas formas: cambiando su conducta, presentando formas o estructuras inusuales, reproduciéndose de

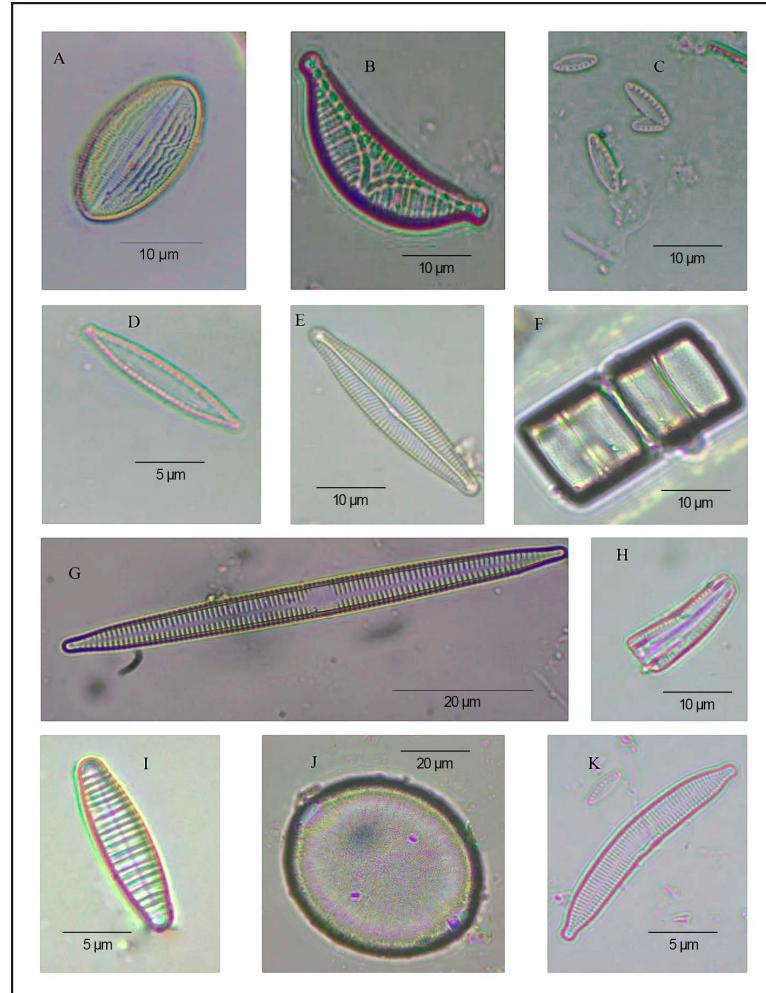
manera descontrolada, siendo infériles, desplazándose a nuevos hábitats, enfermando e incluso extinguiéndose (García *et al.* 2017).

La presencia del lirio se relaciona con la contaminación del agua por metales pesados (García y Ramos Fonseca 2022); el establecimiento de ciertas especies de líquenes en los troncos nos dice que la calidad del aire es muy buena (Lijteroff *et al.*, 2009). Asimismo, una amplia diversidad de comunidades bacterianas indica una óptima salud del suelo (Armando Matute *et al.*, 2018). Y así, encontramos varios casos en la naturaleza que nos sirven para interpretar, a través de los organismos bioindicadores, lo que está sucediendo en los ecosistemas donde habitan.

#### CASO DE ESTUDIO SOBRE CALIDAD DEL AGUA

Para evaluar la calidad del agua no basta con analizar sus características físicas y químicas, es necesario observar, además, la respuesta de los organismos a las diferentes concentraciones de elementos a lo largo del tiempo.

En un trabajo publicado recientemente por Motta y Ranilla (2024), se llevó a cabo un estudio para ver cómo variaba el número y tipo de diatomeas, con respecto a las características físicas, químicas y biológicas del agua de un río de Perú. Las diatomeas son organismos que realizan fotosíntesis, es decir, que a través de la luz solar y el dióxido de carbono pueden producir su propio alimento. Se consideran buenos indicadores de la calidad del agua en ríos porque son sensibles a pequeñas alteraciones de su hábitat. Además, tienen ciclos de vida breves, lo que permite hacer una evaluación del río en corto tiempo. En este estudio se percataron de que en algunos meses (enero y octubre), las principales



**Figura 1.** Fotografías de diferentes especies (A-K) de diatomeas encontradas en el río Ocoña, Perú (Motta y Ranilla 2024)..

características que se modifican en el agua son el aumento del pH (potencial de hidrógeno), de la temperatura y del oxígeno. Lo que coincide también con la mayor cantidad de diatomeas. Una explicación es que al aumentar la temperatura se incrementan los nutrientes (como el sulfato); es decir, las diatomeas podrán tener vitaminas y postre añadido a su menú habitual. Así, dependiendo de la estación, podremos encontrar diferentes especies (Figura 1).

Esta información, será de utilidad para saber en qué meses hay más diatomeas, y de qué especies, para relacionarlo con aquellas características del agua que tengan que ver con su calidad. De esta manera se sabrá si es pertinente beberla o extraer alimentos del río para consumo humano.



© Miguel Ángel Andrade. De la serie Ofrenda Izta Andrade.

## CONCLUSIONES

La pertinencia del estudio con organismos bioindicadores va más allá de los resultados que se obtienen de manera rápida sobre la situación ambiental de un sitio. Este tipo de investigaciones sirve, además, para poder orientar a los que toman decisiones en el uso de los recursos naturales o para intervenir en casos de riesgos a la salud. Por último, es muy recomendable dirigir esfuerzos en la recuperación de aquellas zonas de interés comercial, agrícola o de conservación de la biodiversidad.

## R E F E R E N C I A S

Armando-Matute A *et al.* (2018). Efectos sobre parámetros bioquímicos y biológicos bacterianos en suelos que contienen concentraciones permisibles de metales. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 34(3):441-451.

Flores Sánchez EJ *et al.* (2018). Presencia de plaguicidas organoclorados en muestras biológicas de toninas (*Tursiops truncatus*) y manatíes (*Trichechus manatus manatus*) colectadas en el sur del Golfo de México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 34 (especial sobre Contaminación y Toxicología por Plaguicidas):17-28.

García TA y Ramos Fonseca R (2022). Aquatic macrophytes as bioindicators of metals in water reservoirs in Venezuela. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 38:95-109.

García JM *et al.* (2017). Uso de bioindicadores para la evaluación de la calidad del agua en ríos: aplicación en ríos tropicales de alta montaña. Revisión corta. *UGCiencia* 23:47-62.

Jáquez-Matas SV *et al.* (2022). Impactos económicos y ambientales de los plaguicidas en cultivos de maíz, alfalfa y nogal en Durango, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 38:219-233.

Jiménez J *et al.* (2024). Impacto de la concentración de partículas atmosféricas en las enfermedades respiratorias de la población de la ciudad de los Ángeles, Chile. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 40:455-463.

Lijteroff R *et al.* (2009). Uso de líquenes como bioindicadores de contaminación atmosférica en la ciudad de San Luis, Argentina. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 25(2):111-120.

Motta Mamani JC y Ranilla Falcón CA (2024) Bioindicadores del agua en la cuenca baja del río Ocoña, Departamento de Arequipa, Perú, utilizando diatomeas epilíticas y su relación con algunos parámetros ambientales. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 40:479-493.

Pulido Capurro V *et al.* (2022). El derrame de petróleo en el Terminal 2 de la refinería la Pampilla y sus efectos en la biodiversidad de las costas del litoral marino, Perú. *Arnaldoa* 29(1):71-88.

Romero Nájera I (2024). Dime qué comes y te diré qué bioacumulas. *Revista Digital Universitaria* 25(4):1-10.

Sierra-Cortés JC *et al.* (2019). Plaguicidas organoclorados en agua de la Laguna Negra de Puerto Marqués, Acapulco, Guerrero, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 35(2):397-406.

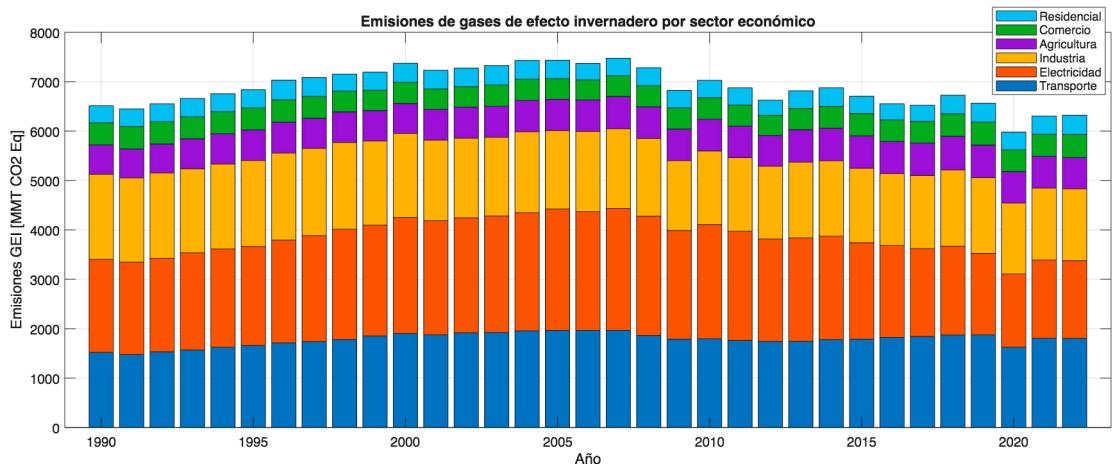
**Irene Romero-Nájera**  
**Instituto de Ciencias de la Atmósfera**  
**y Cambio Climático**  
**Universidad Nacional Autónoma de México**  
[irene.romero@atmosfera.unam.mx](mailto:irene.romero@atmosfera.unam.mx)

# La industria automotriz y su impacto en los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU

**Israel Vivaldo de la Cruz  
Luis Abraham Sánchez Gaspariano**

La industria automotriz es compleja y dinámica. Con la expansión de los mercados globales cada vez más interconectados y los cambios en los patrones de consumo, presenta una serie de desafíos regionales, nacionales e internacionales; sin embargo, también ofrece grandes oportunidades para la innovación y la diversificación de productos y servicios, así como la generación de la triple hélice entre Gobierno, Industria y Academia. Por tanto, es importante analizar el panorama del sector automotriz a escala global con un enfoque crítico hacia los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 de la Organización de las Naciones Unidas (ONU).

En septiembre de 2015, al término del periodo de cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM), los países miembros de la ONU acordaron un nuevo plan de acción a partir del balance de los ODM; se estableció la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible que tiene como base los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). La Agenda 2030 es el resultado del proceso de consultas más amplio y participativo de la historia de la ONU y representa el consenso multilateral entre gobiernos, sociedad civil, sector productivo y academia (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, 2017).



**Figura 1.** Emisiones de Gases de Efecto Invernadero por sector económico. Elaboración propia con datos de US Department of Energy, 2024.

Es claro que la industria automotriz juega un papel muy importante dentro de la Agenda 2030 debido a que se relaciona directamente con varios ODS. Existen diversas referencias de índole histórica (Serna Pérez, 2020), geográfica o de política pública (Organización Internacional del Trabajo, 2021), en las cuales se analizan y discuten las implicaciones ambientales, tecnológicas y sociales de la transición automotriz, así como algunas de las contradicciones entre esta industria y los ODS. A este respecto, un caso de estudio bastante interesante a nivel nacional es el publicado en 2021 por la Red Mexicana del Pacto Global (Pacto Global Red México, 2021), entidad jurídica independiente creada en 2005 por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), integrada al día de hoy por más de 750 empresas. En este análisis se da a conocer la aportación y el estado de madurez de las empresas mexicanas en su contribución a la Agenda 2030, en donde se incluyen acciones y medidas concretas que hoy ya se están implementando con la finalidad de apreciar la evolución y el impacto en las metas planteadas en atención a los ODS. Los hallazgos del estudio incluyen: 1) que no existe un vínculo directo entre la prioridad otorgada a los ODS y el presupuesto específicamente asignado, y 2) que aquellos objetivos vinculados directamente con la conservación ambiental, tal es el caso de los ODS

13, 14 y 15, han quedado relegados a las últimas posiciones del interés de las grandes empresas, que son las que más responsabilidad deberían tener ante estos retos debido a su impacto.

A continuación, se describen los ODS donde la industria automotriz tiene mayor impacto en la Agenda 2030.

#### ODS 3: SALUD Y BIENESTAR

Algunos gases de efecto invernadero (GEI) como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) son causantes de enfermedades cardiorrespiratorias; estos gases se producen durante la quema de combustibles fósiles para el transporte por tierra, aire y mar. La gran mayoría (70 %) de las industrias automotrices se centran en la reducción global de las emisiones en toda la cadena de valor, incluidas las emisiones de alcance 1, 2 y 3, desde el abastecimiento hasta los procesos del final de la vida útil. La industria automotriz está convencida de la necesidad de disminuir la emisión de GEI producidos durante la combustión en los motores de combustión interna. En la Figura 1 se observa la gran participación del sector transporte en la emisión de GEI en Estados Unidos. Por lo tanto, al reducir las emisiones de  $\text{CO}_2$  y  $\text{N}_2\text{O}$  desde el sector transporte, se busca mejorar la calidad del aire y con ello la salud y el bienestar de la población. Para lograr la reducción de GEI desde el sector transporte, se realiza investigación,

innovación y desarrollo de combustibles alternativos que emitan menos GEI; asimismo, se trabaja en: (1) la mejora de la eficiencia de los combustibles a través de diseños, materiales y tecnologías avanzadas; (2) la planificación urbana.

#### **ODS 7: ENERGÍA ASEQUIBLE Y NO CONTAMINANTE**

El consumo total de energía final de 2022 fue de 442 exajulios (EJ), los cuales se dividen como sigue: industria (167 EJ), residencial y comercial (133 EJ), transporte (116 EJ) y otros (26 EJ). Es notoria la gran cantidad de energía que consume el sector transporte, por lo cual es necesario virar hacia las fuentes de energía sostenibles. De acuerdo con la perspectiva mundial basada en las últimas políticas energéticas, climáticas e industriales relacionadas, se tiene un escenario de crecimiento del 1.1 % cada año hasta 2030, y luego continúa aumentando a un ritmo más lento hasta 2050.

Hoy en día se sabe que las tecnologías eléctricas como las bombas de calor y los vehículos eléctricos proporcionan servicios energéticos más eficientes que las tecnologías rivales basadas en la combustión directa de combustibles fósiles. De acuerdo con los diferentes escenarios de la Agenda 2030, las tecnologías eléctricas se expanden más rápidamente en los escenarios APS (Escenario de Compromisos Anunciados, por sus siglas en inglés) y NZE (Emisiones Netas Cero, por sus siglas en inglés) que en el STEPS (Escenario de Políticas Anunciadas, por sus siglas en inglés). El porcentaje de electricidad en el consumo total de energía final aumenta de alrededor del 20 % actual en 2 puntos porcentuales en el STEPS para 2030, en 4 puntos porcentuales en el APS y en 8 puntos porcentuales en el NZE; estas diferencias son cruciales, pues aportan el ahorro energético necesario.

La generación de energía eléctrica debe modificarse para dar paso a las fuentes de energía renovables y sostenibles. Por su parte, el uso directo de energías renovables en el consumo total de energía final aumenta significativamente en cada escenario: un 3 % anual en el STEPS, un 7 % en el APS y un 9 % en el escenario NZE de aquí a 2030.

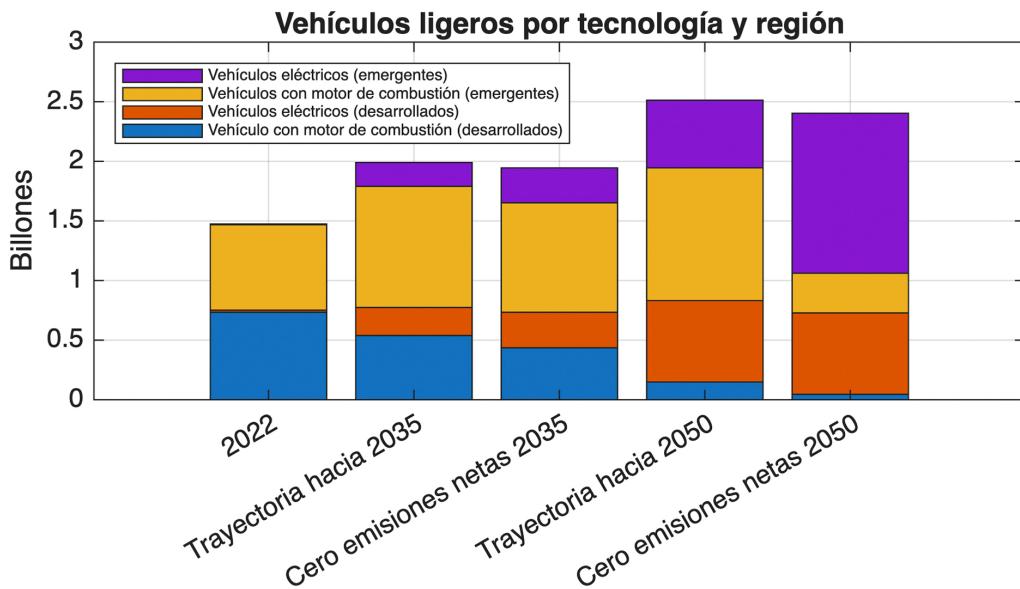
Asimismo, la participación del petróleo en la demanda energética del transporte por carretera desciende del 92 % actual al 88 % en el escenario STEPS, al 84 % en el APS y al 78 % en el escenario NZE para 2030. El cambio tectónico necesario hacia la electromovilidad y el mayor uso de biocombustibles impulsan este descenso.

Consideremos que, aun con el apoyo de las fechas de retirada progresiva de los vehículos con motor de combustión interna y los incentivos a la electromovilidad, y pese a que los vehículos eléctricos representarán casi el 20 % del total de vehículos-kilómetro de carretera en el APS en 2030, y a pesar de que los vehículos eléctricos son entre tres y cuatro veces más eficientes que los vehículos con motor de combustión interna, estos solo representan el 5 % de la demanda energética del transporte por carretera. Por lo tanto, la transición hacia la electromovilidad y la investigación de fuentes de energía renovables y sostenibles son pilares para alcanzar el ODS 7 de la Agenda 2030.

#### **ODS 9: INDUSTRIA, INNOVACIÓN E INFRAESTRUCTURA**

La infraestructura relacionada con la industria automotriz abarca desde las plantas de ensamblaje y fabricación de componentes hasta la red de distribución y logística a nivel mundial. Las políticas gubernamentales y el marco regulatorio desempeñan un papel crucial en el desarrollo y la competitividad de la industria automotriz a nivel nacional e internacional; estas políticas varían significativamente entre los diferentes países y regiones, y abarcan aspectos como los estándares de emisiones, la seguridad vehicular, los incentivos fiscales y las barreras comerciales (World Trade Organization, 2019).

El sector automotriz se verá afectado por la ralentización del gasto de los consumidores, los elevados tipos de interés y la transición hacia la electromovilidad. Los vehículos eléctricos (VE, por sus siglas en inglés) seguirán siendo la parte más punjante del mercado, con un aumento de las ventas del 21 % (Economist Intelligence Unit, 2024); China



**Figura 2.** Vehículos ligeros totales por tecnología y región para diferentes escenarios. Elaboración propia con datos de British Petroleum (2024).

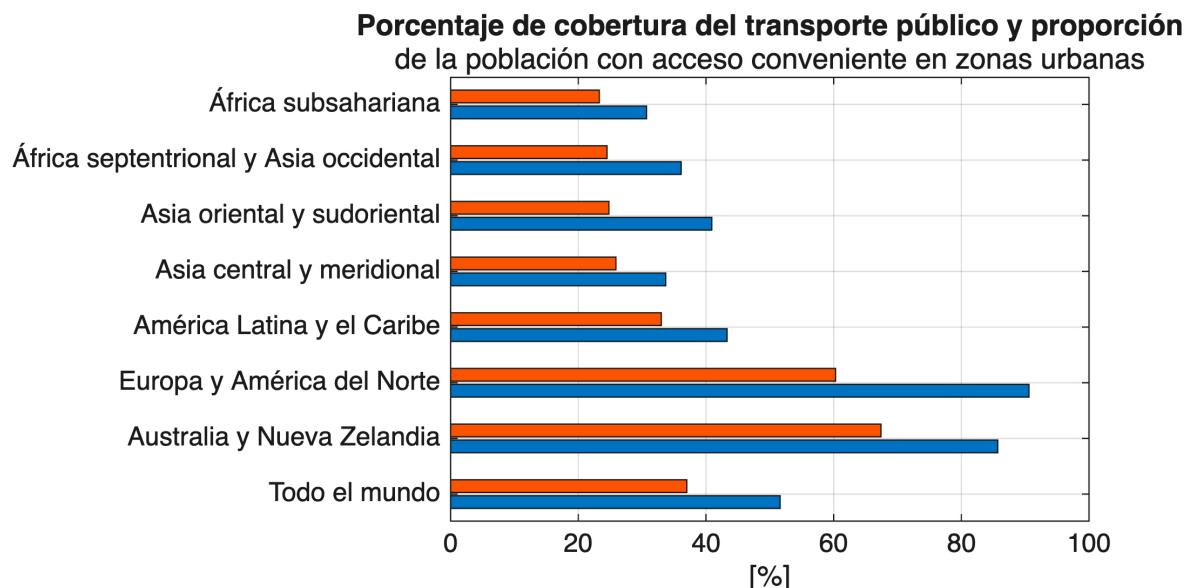
representa más de la mitad de las ventas de VE y un porcentaje similar de las exportaciones, pero el apoyo del gobierno chino al sector provoca tensiones comerciales. La legislación sobre emisiones se endurecerá aún más, y muchas ciudades introducirán normativas sobre aire limpio que afectarán al uso de los vehículos. Se espera que las restricciones favorezcan la demanda de vehículos nuevos, incluidos los eléctricos, pero frenen las ventas de vehículos de segunda mano. El gobierno, los fabricantes de automóviles y la academia deben trabajar para aliviar la ansiedad por la autonomía entre los usuarios de VE. Esto incluirá un cambio en las normas de recarga, el despliegue de estaciones de recarga rápida y la introducción de nuevas tecnologías de baterías para mejorar la autonomía y el rendimiento.

Se esperaba que a partir de 2024 más empresas automovilísticas adoptasen el Estándar de Carga Norteamericano (NACS) desarrollado por Tesla para sus clientes estadounidenses y canadienses. Se busca que el NACS se convierta en el estándar del sector en Norteamérica, aunque Europa seguirá confiando en el Sistema de Carga Combinada (CCS), con adaptadores cada vez más comunes. Japón y China avanzarán en la implantación de una norma

Chaoji común para Asia, con vistas a sustituir a la japonesa CHAdeMO y la china GB/T (Economist Intelligence Unit, 2024).

Ford, General Motors, Mercedes-Benz, Nissan, Volvo, Honda y Stellantis abrirán en conjunto una red de estaciones de carga rápida para Norteamérica; la red ofrecerá recarga para conectores CCS y NACS. Se espera que el despliegue de estaciones de recarga rápida CCS en toda la Unión Europea (UE) se acelere en 2024, tras la aprobación del Reglamento sobre infraestructuras de combustibles alternativos en julio de 2023 (Economist Intelligence Unit, 2024). La ley exige estaciones de recarga rápida cada 60 km en todos los principales corredores de transporte de la UE a partir de 2025.

Los objetivos para las nuevas tecnologías de baterías de los VE son aumentar la densidad de carga, reducir el tiempo de carga, disminuir los costos de recarga y mejorar la seguridad (disminuir la probabilidad de incendio). Las baterías de iones de litio darán un salto adelante cuando Gotion, con sede en China, lance sus baterías de litio hierro manganeso fosfato (LMFP), que, según la empresa, pueden alcanzar una autonomía de hasta 1000 km antes de la recarga; la producción en serie estaba prevista para 2024. Por otro lado, BYD, un fabricante de automóviles chino, también empezará a producir en



**Figura 3.** Porcentaje de cobertura de transporte público y proporción de la población con acceso conveniente al mismo en zonas urbanas. Elaboración propia con datos de (Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas, 2023).

masa baterías de iones de sodio en su fábrica de Xuzhou; más que ofrecer autonomía y potencia, su objetivo es reducir costos utilizando sodio en lugar de iones de litio (Economist Intelligence Unit, 2024).

Mientras que las revolucionarias baterías de estado sólido, que podrían ahorrar espacio y reducir el riesgo de incendio, podrían tardar más. Así, las empresas automotrices también deben realizar inversiones directas, firmar acuerdos de suministro a largo plazo y centrarse en el reciclaje para garantizar el suministro ininterrumpido de materiales clave para la fabricación de baterías. Existe un camino amplio para la innovación tecnológica en vehículos más eficientes y sostenibles, así como el desarrollo de infraestructura para el sector automotriz y de transporte.

#### **ODS 11: CIUDADES Y COMUNIDADES SOSTENIBLES**

Los vehículos híbridos y eléctricos emiten menos GEI que los motores de combustión convencionales. Nueve de cada diez personas que viven en zonas urbanas de todo el mundo respiran aire que no cumple las directrices de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud. Se espera que los vehículos con motores de combustión convencionales disminuyan paulatinamente mientras se incrementa la

participación de VE actuales, VE que están en desarrollo, así como vehículos de combustión interna más eficientes en fase de desarrollo (Figura 2).

El parque de vehículos ligeros se electrifica cada vez más a lo largo de los diferentes escenarios, liderado por los cambios en las economías desarrolladas. Esta creciente electrificación está impulsada por el endurecimiento de las políticas públicas y la regulación de emisiones, apoyada por el aumento de la competitividad de los costos de los vehículos eléctricos a medida que los costos de las baterías siguen bajando y la fabricación de este tipo de vehículos se amplía progresivamente. Al igual que en el caso de los vehículos ligeros, el endurecimiento de las normas obliga a abandonar el uso de productos derivados del petróleo en favor de combustibles más bajos en carbono (International Energy Agency, 2024). La electrificación creciente de los camiones representa la mayor parte de este cambio, con el hidrógeno desempeñando un papel protagónico, especialmente para los camiones pesados de larga distancia en Net Zero. El gas natural, incluido el biometano, también representa una parte cada vez mayor, y su uso se concentra en China y en las economías en desarrollo, incluida la India.

La calidad y disponibilidad de la infraestructura de transporte varía mucho entre países y regiones, e incluso dentro de las propias ciudades. En los países desarrollados, las personas tienden a tener más de una opción de transporte, aunque no siempre esté disponible de manera equitativa o ambientalmente sensible. Existe una necesidad apremiante de que las ciudades de todo el mundo integren a los sistemas de transporte motorizado la posibilidad de movilización de peatones y bicicletas mediante planes de movilidad urbana sostenible a largo plazo, inversiones específicas en infraestructura y la implementación de normativas. (Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas, 2023.)

En la Figura 3 se presenta la cobertura de transporte público y proporción de la población con acceso conveniente a este para las zonas urbanas. La electromovilidad es una parte importante para la descarbonización del transporte, de tal manera que para 2050 el principal propulsor para el transporte será la electricidad. Vehículos más amigables con el planeta y sistemas de transporte sostenibles son esenciales para ciudades más habitables.

#### **ODS 12: PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLES**

#### **+ ODS 13: ACCIÓN POR EL CLIMA**

Dentro de la Cadena de Suministro Automotriz, las empresas fabricantes del producto original (OEM), niveles 1, 2, 3 y 4, buscan reducir la emisión de GEI contemplando el ciclo de vida del producto. La manufactura de autos toma en cuenta el uso de materiales sostenibles y reutilizables. Tal es el caso de materiales biodegradables y procedimientos ecológicamente amigables, que persiguen la disminución de la huella de carbono. De este modo, estas transformaciones buscan, además de un producto final sostenible, que el proceso de fabricación del mismo sea respetuoso con el medio ambiente (Organización Internacional del Trabajo, 2021).

El último Informe de síntesis del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) afirma de forma inequívoca que las actividades humanas, en

particular más de un siglo de quema de combustibles fósiles, el uso no sostenible de la energía y los suelos, y los regímenes de consumo y producción insostenibles, provocaron un calentamiento global de 1.1 °C por encima de los niveles preindustriales. El IPCC advierte que si no se refuerzan las políticas intersectoriales es probable que el mundo supere el crítico punto de inflexión de 1.5 °C en 2035. (Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas, 2023.)

Indudablemente, si se desea contribuir significativamente al aminoramiento del cambio climático, hay que reducir inmediata y sostenidamente las emisiones de los GEI de forma multisectorial. Para tal efecto se requieren acciones globales encaminadas hacia el desarrollo de resiliencia del clima, así como medidas de adaptación y mitigación y, por supuesto, el buen aprovechamiento de las sinergias de los ODS. Dentro de las acciones más urgentes se encuentran: el financiamiento, el compromiso político, las políticas coordinadas, la cooperación internacional, la gestión de ecosistemas y la gobernanza inclusiva (Organización Internacional del Trabajo, 2021).

Cabe señalar que una de las acciones innovadoras de los modelos de producción de economía circular empleados en la industria automotriz, enfocada hacia la sostenibilidad, es el reciclaje y la reutilización de componentes automovilísticos, lo cual es coadyuvante en la búsqueda de una industria automotriz más limpia y amigable con la ecología (Organización Internacional del Trabajo, 2021).

#### **CONCLUSIONES**

La Agenda 2030 es el resultado del consenso a nivel mundial entre Gobierno, Sociedad Civil, Sector Productivo y Academia. Esta agenda se basa en 17 objetivos ODS, cinco de los cuales se relacionan directa e indirectamente con la industria automotriz: Salud y bienestar (ODS 3), Energía asequible y no contaminante (ODS 7), Industria, Innovación e Infraestructura (ODS 9), Ciudades y comunidades sostenibles (ODS 11), Producción y consumo responsables (ODS 12) y Acción por el clima (ODS 13). Estos cinco objetivos suponen una serie de desafíos regionales, nacionales e internacionales



© Miguel Ángel Andrade. De la serie *Café Andrade*.

a toda la industria, particularmente a la automotriz por la coyuntura de todos ellos, pero también de oportunidades para la innovación y la diversificación de productos y servicios, así como para la generación de la triple hélice entre gobierno, industria y academia.

#### N O T A

Este texto fue redactado por los autores, y se apoyó parcialmente en herramientas de inteligencia artificial (IA generativa) para la mejora del estilo y sugerencias gramaticales. Las ideas, interpretaciones, selección de información y conclusiones son responsabilidad exclusiva de los autores.

#### R E F E R E N C I A S

British Petroleum (2024). BP Energy Outlook 2024 edition. Recuperado de: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2024.pdf>.

Economist Intelligence Unit (2024). Automotive Outlook 2024. Recuperado de: <https://www.eiu.com/n/campaigns/automotive-in-2024>.

Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (2017). ¿Qué es la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible? Recuperado de <https://www.gob.mx/inafed/articulos/que-es-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible>.

International Energy Agency (2024). World Energy Outlook 2024. Recuperado de: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>.

Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas (2023). Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2023. Naciones

Unidas. Recuperado de: [https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023\\_Spanish.pdf](https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023_Spanish.pdf).

Organización Internacional del Trabajo (2021). El futuro del trabajo en la industria automotriz y la necesidad de invertir en la capacidad de las personas y el trabajo decente y sostenible.

Recuperado de: <https://www.ilo.org/es/resource/otro/el-futuro-del-trabajo-en-la-industria-automotriz-y-la-necesidad-de-invertir>.

Pacto Global Red México (2021). Las empresas mexicanas por la agenda 2030 en la década de acción. Recuperado de: <https://pactoglobal.org.mx/las-empresas-mexicanas-por-la-agenda-2030-en-la-decada-de-accion/>.

Serna-Pérez, María G. (2020). Participación de las entidades federativas en el cumplimiento de la Agenda 2030: el caso Aguascalientes. En: Citlali Ayala Martínez/Gustavo Sosa Núñez, (Coords.), La Agenda 2030. Diagnóstico, avances y oportunidades en México, Instituto Mora, (pp 100-121). Recuperado de: <https://www.ohchr.org/sites/default/files/Documents/Issues/LocalGvt//States/20190218Mexico2.pdf>.

US Department of Energy (2024). U.S. Greenhouse gas (GHG) emissions by economic sector. Recuperado de: <https://afdc.energy.gov/data>.

World Trade Organization (2019). World Trade Report 2019: The future of services trade. Switzerland: World Trade Organization.

Recuperado de: [https://www.wto.org/english/res\\_e/booksp\\_e/00\\_wtr19\\_e.pdf](https://www.wto.org/english/res_e/booksp_e/00_wtr19_e.pdf).

**Israel Vivaldo de la Cruz**

**Luis Abraham Sánchez Gaspariano**

**Facultad de Ciencias de la Electrónica**

**Benemérita Universidad Autónoma de Puebla**

***luis.sanchezgas@correo.buap.mx***

© Miguel Ángel Andrade. De la serie *Café Andrade*.



# Hongos de Oaxaca: biodiversidad, tradición y sabor

**Alexanders López-García  
Marko Gómez-Hernández**

Al hablar de hongos, lo más probable es que visualicemos la forma de un champiñón o una seta. Sin embargo, existen miles de especies microscópicas y macroscópicas con formas, tamaños y colores diversos, que pueden resultarnos fascinantes o incluso generarnos algo de temor. En los últimos años ha habido mucho revuelo acerca del número de especies de hongos que existen en el mundo; un estudio reciente reportó 140,000 especies descritas (Hyde *et al.*, 2024). Otras investigaciones sugieren que son más de dos millones (Blackwell, 2011; Hawksworth y Lücking, 2017), de las cuales el 70 % son microscópicas y el 30 % macroscópicas. Los hongos macroscópicos se caracterizan por la producción de esporomas o cuerpos fructíferos visibles a simple vista, a los que comúnmente llamamos hongos, y son los que muchas veces vemos creciendo en el bosque o acostumbramos a consumir en ensaladas, pizzas, sopas, etcétera.

Este asombroso reino Fungi tiene una importante representación en México, un país reconocido por su riqueza biocultural y su tradición en el consumo de hongos silvestres, especialmente en comunidades rurales indígenas y mestizas. Después de China, donde se consumen cerca de 600 especies de hongos, México ocupa el segundo lugar con más de 450 especies registradas (Pérez-Moreno *et al.*, 2020).

Los estados del centro y sur del país concentran la mayor cantidad, y Oaxaca se destaca como la región con mayor diversidad cultural y biológica, además de albergar la mayor riqueza de hongos en México, con 1,630 especies registradas (Raymundo-Ojeda *et al.*, 2022).

Este trabajo propone un recorrido que articula la biodiversidad fúngica con la diversidad cultural y la tradición gastronómica, mostrando cómo los hongos representan un puente entre naturaleza y cultura en Oaxaca.

#### DE OAXACA PARA EL MUNDO

Harlar de Oaxaca es conectar con la riqueza de sus pueblos originarios, la diversidad de sus lenguas, su asombrosa biodiversidad y su exquisita gastronomía. En el contexto de los hongos, es común pensar primero en los llamados hongos enteógenos o neurotrópicos, términos que a menudo se usan como sinónimos, pero que tienen diferencias relevantes. Neurotrópico es un término técnico, relacionado con los efectos farmacológicos de ciertas especies en el sistema nervioso; enteógeno, en cambio, alude al uso cultural y simbólico que se hace de los hongos en contextos rituales o religiosos.

Oaxaca es reconocida como la cuna de la etnomicología, disciplina que desde 1957 se ha dedicado al estudio del uso de los hongos por comunidades humanas. Sin embargo, su alcance va más allá del simple aprovechamiento de estos organismos: explora la cosmovisión, la percepción cultural, los nombres que reciben tanto en lenguas indígenas como en español, y la forma en que este conocimiento se transmite. Para que esta disciplina se consolidara, fue necesario un largo proceso en el que destacaron personajes como Roger Heim, Richard Evans Schultes, Blas Pablo Reko y Robert Gordon Wasson. Este último, considerado el padre de la etnomicología, conoció en la región mazateca de Oaxaca a María Sabina, la célebre sacerdotisa de los hongos, quien compartió con él su conocimiento sobre el uso ritual de los hongos enteógenos en ceremonias

de curación. Este interés relativamente reciente por los hongos en Oaxaca puede entenderse mejor si se observa su trasfondo histórico, en el que existen registros sobre su uso ritual en Mesoamérica.

#### TEONANÁCATL Y EL SURGIMIENTO DE LA ETNOMICOLOGÍA

El vínculo entre los hongos y los humanos se remonta a miles de años. Evidencias arqueológicas como monolitos, pinturas rupestres y códices confirman su uso en distintas regiones del mundo. Uno de los registros emblemáticos en Mesoamérica es el del teonanácatl, término náhuatl que significa “la carne de Dios” y que en la época prehispánica usaban los mexicas para referirse a hongos empleados en rituales. Su uso quedó documentado en textos como el Códice Florentino de fray Bernardino de Sahagún en el siglo XVI.

Con la llegada de los españoles, estas prácticas fueron perseguidas por considerarse herejías (Ruan-Soto, 2007). Sin embargo, el conocimiento sobre el teonanácatl sobrevivió en regiones apartadas, transmitiéndose de generación en generación. Paradójicamente, siglos después fue el mismo Códice Florentino el que despertó el interés de investigadores como Blas Pablo Reko, Richard Evans Schultes y Robert Gordon Wasson.

A principios del siglo XX, el médico austriaco Blas Pablo Reko llegó a radicar a la región mazateca de Oaxaca, donde observó que la gente local consumía hongos con fines rituales, por lo que dedujo que se trataba del *teonanácatl* mencionado por Sahagún. En 1938, Reko invita al etnobotánico estadounidense Richard Evans Schultes a Huautla de Jiménez, Oaxaca, para mostrarle los hongos sagrados, y al año siguiente Schultes publica el capítulo de libro “La carne de los dioses”, el primer trabajo científico donde se menciona al *teonanácatl*. En 1952, el periodista financiero estadounidense Robert Gordon Wasson, quien era aficionado a estudiar el uso de los hongos por diferentes grupos étnicos alrededor del mundo, leyó una publicación de Schultes acerca de los hongos sagrados en Oaxaca y decide viajar a Huautla de Jiménez a estudiar el culto a los hongos en esa región. Esto condujo a la publicación, en 1957, de *Russia,*

*Mushrooms and History*, el primer libro dedicado al uso de los hongos en un contexto humano, escrito por R. Gordon Wasson. Ese mismo año, el autor difundió en la revista *Life* el artículo “Seeking the magic mushroom”. Ambos acontecimientos despertaron el interés de la comunidad científica y marcaron el inicio de lo que hoy se conoce como etnomicología.

#### EL APROVECHAMIENTO DE LOS HONGOS SILVESTRES

El uso de los hongos en Oaxaca no se limita a los enteógenos. En los mercados locales es común encontrar una gran variedad de hongos silvestres comestibles, muy apreciados por su sabor y por la importancia que tienen en la cocina tradicional.

Antes de que los hongos lleguen a los mercados, ocurre un proceso fundamental: la recolección de los esporomas (Figura 1). Esta actividad involucra a niños, hombres y mujeres, quienes seleccionan cuidadosamente los ejemplares destinados a la venta o al autoconsumo (López García *et al.*, 2024).

La recolección puede ser espontánea o planificada. De manera espontánea, los campesinos suelen

encontrarlos mientras realizan sus actividades diarias, por lo que recolectan los ejemplares en el momento. Por otro lado, las salidas planeadas reúnen a familias y amigos en una actividad comunitaria que puede resultar en la recolección de por lo menos un kilogramo.

Esta práctica es selectiva y emplea diversas estrategias para garantizar futuras cosechas. Por ejemplo, se respeta el estado de fructificación recolectando únicamente los hongos maduros. Para evitar dañar el micelio, se restringen actividades como la extracción de leña en áreas con alta producción de esporomas, contribuyendo así a la preservación del recurso. Estas estrategias han sido fundamentales para desarrollar iniciativas que promueven el manejo sostenible y responsable de este valioso recurso.

Sin embargo, esta actividad ha cambiado significativamente con el paso de los años. En los mercados locales, ya no se observan las abundantes cantidades de hongos que solían ser comunes décadas atrás. Además, los hongueros (personas dedicadas exclusivamente a la comercialización de hongos) son cada vez más escasos. Durante la década de 1990, los hongueros podían llegar a recolectar hasta dos toneladas al año, según los registros de León-Avendaño (1995). Esta cifra nos habla de un tiempo en el que los hongos silvestres no solo eran un sustento económico, sino también un reflejo de la riqueza natural y cultural de las comunidades.

En cuanto a la gastronomía, los hongos se preparan en una amplia variedad de formas: mole, amarillo, tamales, escabeche, fritos, asados o en el tradicional piltre, donde se asan envueltos en hojas de hierba santa. En épocas de abundancia, llegan a sustituir a la carne como ingrediente principal. Estas preparaciones, que varían según la región, reflejan tanto la riqueza cultural como los recursos naturales locales.

#### LOS NOMBRES DE LOS HONGOS COMESTIBLES

Generalmente, los hongos comercializados son aquellos más conocidos en la región, y esto puede ser por su multifuncionalidad, sabor o abundancia. Destacan especies como el complejo *Amanita caesarea*,



**Figura 1.** Niña chinanteca recolectando hongos en la comunidad de Santiago Comaltepec, Oaxaca (publicación autorizada por la madre de la niña).



**Figura 2.** *Ramaria* sp., especie comestible recolectada en comunidades indígenas de Oaxaca.

*Cantharellus cibarius*, *Lactarius volemus* o *Ramaria* spp. (Figura 2), reconocidas por diversos nombres locales.

Por ejemplo, *Cantharellus cibarius* (Figura 3) es conocido como “hongo amarillo” por los chinantecos y zapotecos, “hongo de flor” por los chontales, “hongo de calabaza” por los chatinos y “hongo flor de calabaza” por los mixtecos. Estos nombres reflejan aspectos culturales y ecológicos únicos de cada comunidad.

Los nombres locales integran información clave sobre los hábitos de crecimiento de las especies, sus usos culturales y, en algunos casos, su relación con la cosmovisión de los pueblos originarios. Esta característica lo distingue de la taxonomía científica; sin embargo, existe evidencia de que esta forma de *clasificación popular ha servido como base para el desarrollo de la taxonomía formal*. Por ejemplo, entre los chinantecos, zapotecos, mixtecos y mazatecos, un mismo nombre se usa para identificar a una especie específica: *Lactarius volemus*, conocida como “hongo de leche”. Esto se debe a que, al romperse su cuerpo fructífero, el hongo libera un látex blanco. Esta característica tan visible inspiró

tanto su nombre común como el del género en la taxonomía científica.

En lenguas indígenas, los términos para “hongo” también muestran gran diversidad: los chinantecos los llaman *nít* o *nañ*, los mixtecos *jí'i*, los zapotecos emplean variantes como *baya*, *bella* o *be'ya*, los mazatecos *tjiin*, los chatinos *kía* y los chontales *jlapili*. Los nombres en español suelen ser traducciones literales de los términos indígenas, y generalmente se componen de un genérico acompañado de adjetivos que aluden a características, lugares de crecimiento o significados simbólicos.

#### ¿QUÉ HACE FALTA?

Actualmente, el conocimiento tradicional se encuentra en un proceso de transformación acelerada, impulsado principalmente por factores sociales como la modernización, la migración y la globalización, así como por factores ecológicos como la pérdida de biodiversidad y el cambio climático.

Menos de la mitad de los 16 pueblos originarios de Oaxaca han sido estudiados desde la perspectiva etnomicológica. Es urgente ampliar las investigaciones



**Figura 3.** *Cantharellus cibarius*, una de las especies comestibles de mayor importancia cultural en Oaxaca.

hacia grupos como los amuzgos, tacuates, chocholtecos, cuiacatecos, huaves, ixcatecos, nahuas, triquis, zoques y mixes.

Revalorar el uso de los hongos silvestres resulta esencial, pues su presencia en los mercados ha disminuido y la dieta local tiende a incorporar más alimentos procesados. Promover su consumo no solo contribuye a la conservación biocultural, sino que también ofrece beneficios potenciales para la salud, al integrarse como alimentos frescos y nutritivos en la mesa oaxaqueña.

#### R E F E R E N C I A S

- Blackwell M (2011). The fungi: 1, 2, 3... 5.1 million species? *American Journal of Botany* 98:426-438.
- Hawksworth DL y Lücking R (2017). Fungal diversity revisited: 2.2 to 3.8 million species. *Microbiology Spectrum* 5(4):79-95.
- Hyde KD, Noorabadi MT, Thiagaraja V, He MQ, Johnston PR, et al. (2024). The 2024 Outline of Fungi and fungus-like taxa. *Mycosphere*. 15(1):5146-6239.
- León Avendaño H (1995). Aprovechamiento y perspectivas del cultivo de hongos comestibles silvestres de la Sierra Juárez de Oaxaca. En: Vázquez-Dávila MA (Ed.), *La Tecnología Agrícola Tradicional. Sociedad y Naturaleza en Oaxaca* (pp. 119-138). México.

López García A, Gómez Hernández MA y Gándara E (2024). Variation in traditional knowledge of culturally important macromycete species among three indigenous communities of Oaxaca, Mexico. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine* 20:38.

Pérez Moreno J, Martínez Reyes M, Hernández Santiago F y Ortiz López I (2020). Climate change, biotechnology, and Mexican neotropical edible ectomycorrhizal mushrooms. En: Pérez Moreno J, Guerin Laguette A, Flores-Arzú R y Qiang Yu (Eds.), *Mushrooms, humans, and nature in a changing world* (pp. 61-91). Springer, Cham, Switzerland.

Raymundo Ojeda T, Valenzuela Garza R, León Avendaño HH, Gay González AD, García Jiménez J y Bautista Hernández S (2022). Hongos. En: Gómez Hernández CV, Nájera Cordero KC y Cruz Medina J (Eds.), *Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad* (pp. 45-61). México.

Ruan-Soto F (2007). 50 años de etnomicología en México. *Lacandonia*. 1:97-108.

Wasson RG y Wasson VP (1957). *Russia, mushrooms and history* (Vols. I-II). New York: Pantheon Books.

#### **Alexanders López-García**

**Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca  
Instituto Politécnico Nacional  
alopezg2108@alumno.ipn.mx**

#### **Marko Gómez-Hernández**

**SECIHTI-Facultad de Ciencias Biológicas  
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla**

© Miguel Ángel Andrade. De la serie *Café Andrade*.



# Del ataque a la defensa: el potencial oculto de los patógenos en la agricultura

**María del Sol Cuéllar-Espejel  
Gabriel Rincón-Enríquez**

En el mundo vegetal, la defensa contra patógenos y condiciones adversas no depende únicamente de la suerte o del uso de agroquímicos. En la actualidad, la agricultura enfrenta desafíos significativos debido a la sequía, las plagas y las enfermedades que afectan la producción y calidad de los alimentos. En particular, las enfermedades causadas por gérmenes de plantas representan una grave amenaza por su impacto económico y ambiental. Si bien, ante la controversia, el uso de pesticidas sigue siendo el método predominante para su control (Bonaterra *et al.*, 2022). En respuesta, la ciencia ha centrado sus esfuerzos en el desarrollo de alternativas sostenibles que reduzcan la dependencia de estos pesticidas, promoviendo una producción agrícola más segura y respetuosa con los agroecosistemas.

Una de las aplicaciones más prometedoras del control biológico es el uso de biopesticidas, productos formulados a partir de microorganismos, sus derivados o componentes naturales de las plantas, que combaten plagas y enfermedades (Kumar *et al.*, 2024). Además de disminuir el impacto ambiental, estos productos también reducen la dependencia de los pesticidas químicos, lo cual los convierte en una opción eficaz y sostenible para la agricultura moderna (Ayilara *et al.*, 2023). Los biopesticidas

basados en microorganismos comprenden virus, bacterias, protozoos, algas y hongos. Se utilizan los microorganismos completos o alguno de sus componentes como, por ejemplo, las proteínas; estas pueden contribuir a robustecer la defensa de las plantas o a detener directamente el desarrollo del germen. Dentro de estos biopesticidas, se puede hacer uso tanto de bacterias benéficas (*Bacillus*, *Streptomyces*, *Rhizobium*, *Alcaligenes*, *Arthrobacter*, *Stenotrophomonas* y *Serratia*), como de bacterias que enferman a las plantas (bacterias patógenas: *Agrobacterium*, *Erwinia* y *Xanthomonas*). Las primeras pueden limitar el desarrollo de enfermedades al competir por espacio y nutrientes, producir compuestos antimicrobianos y secretar compuestos que atacan la pared celular de los gérmenes (Bonaterra *et al.*, 2022). Sin embargo, las bacterias patógenas curiosamente también poseen mecanismos similares, lo que puede engañar a la planta y permitir que estas causen la invasión e infección y produzcan una enfermedad.

A partir de este conocimiento surge una estrategia innovadora en la que se aprovecha las herramientas que poseen las bacterias, en especial de las bacterias patógenas de plantas, en las cuales se detectan los arsenales de ataque que tienen estas bacterias y que podrían utilizarse para defensa de la planta. De este modo, los científicos han identificado proteínas y compuestos derivados de bacterias patógenas que, aplicados de forma controlada, pueden actuar como bioinductores o elicidores de las defensas naturales de la planta; y a pesar de su procedencia, no constituyen una amenaza para la salud humana, el medio ambiente o la planta. Estos derivados ayudan a fortalecer la resistencia de las plantas y a disminuir el crecimiento de los patógenos, funcionando como una especie de “escudo” basado en las mismas armas que usan los microorganismos para atacar a la planta. Este fenómeno, resultado de la interacción entre microorganismos y plantas, ha despertado un gran interés en la investigación agrícola por su potencial para fortalecer la resistencia vegetal a los gérmenes que causan enfermedades.

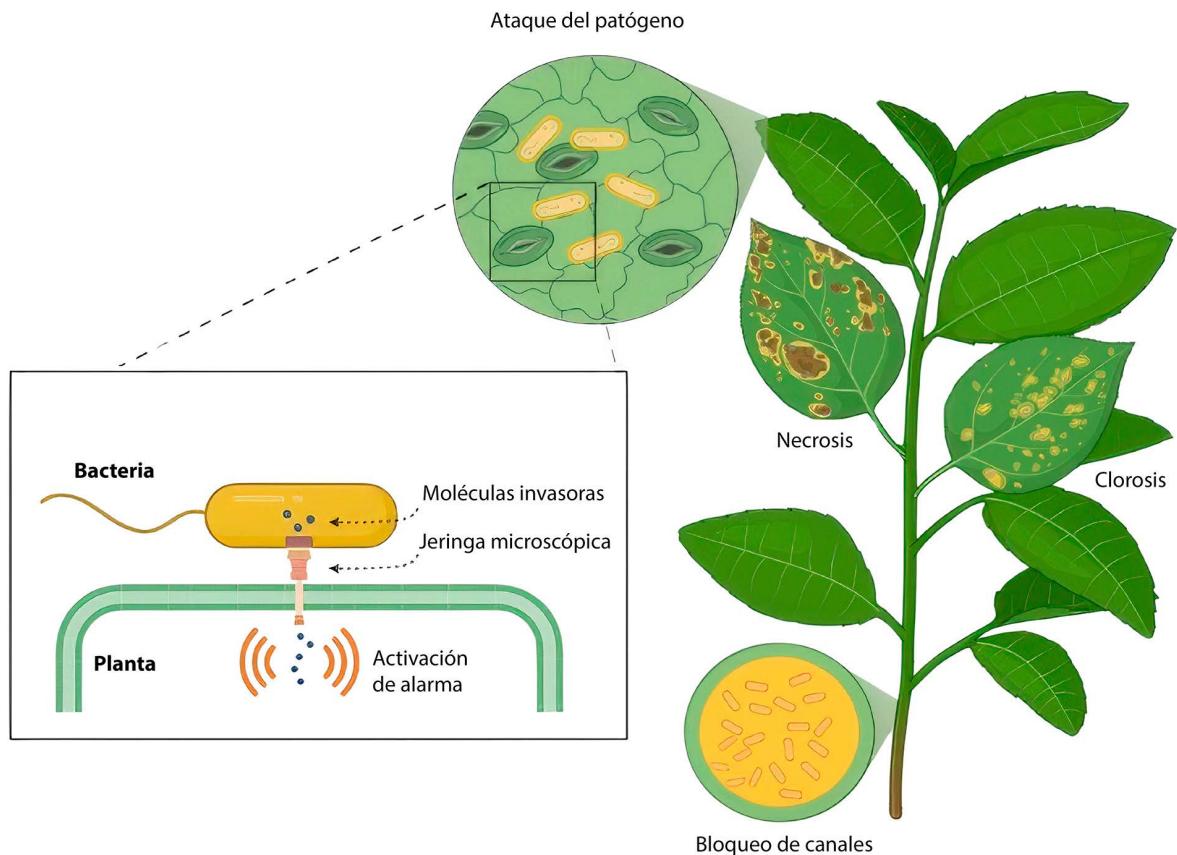
#### ELICITORES: DEFENSAS INVISIBLES

Los elicidores constituyen una táctica prometedora para salvaguardar el cultivo de plantas. Estas sustancias, que pueden ser de origen químico o biológico, tienen la habilidad de activar los mecanismos naturales de defensa de las plantas y así aumentar su resistencia frente a los patógenos. Esto significa que, en lugar de depender exclusivamente de pesticidas químicos, es posible estimular a las propias plantas para que se defiendan de plagas, enfermedades o condiciones ambientales adversas. Cuando una planta entra en contacto con un elicitor, se pone en marcha una serie de respuestas internas: produce compuestos defensivos, refuerza su pared celular y activa genes relacionados con la inmunidad natural de la planta. Esta reacción no ocurre al azar, sino de forma muy específica, como si la planta tuviera un sistema de alarma y, cuando percibe que ha entrado un intruso, identificara la señal y se preparara para resistir el ataque y protegerse mejor frente a posibles amenazas.

Según estudios recientes (Gowtham *et al.*, 2024), incluso ciertos estímulos físicos bien controlados (como sequía, salinidad, radiación UV, estrés osmótico y térmico) pueden desencadenar esta activación. Los elicidores son muy diversos, algunos de ellos son fragmentos minúsculos de ARN, una molécula similar al ADN que actúa como un tipo de instrucción rápida dentro de las células. Algunos son compuestos químicos generados por los microorganismos, mientras que muchos otros son proteínas específicas que interaccionan con las plantas actuando como mensajeros especializados.

#### LA MANCHA BACTERIANA: EL ENEMIGO DEL CHILE Y EL TOMATE

En el mundo agrícola, una de las amenazas más persistentes para la producción de chile y tomate es una enfermedad conocida como mancha bacteriana. Este mal, que afecta tanto el rendimiento como la calidad de los cultivos, es causado por bacterias del género *Xanthomonas*, expertas en invadir tejidos vegetales y debilitar sus defensas naturales.



**Figura 1.** Esquema del proceso de infección por *Xanthomonas spp.* Las bacterias aprovechan pequeñas aberturas naturales o heridas para entrar en la planta, donde se establecen y comienzan a bloquear los mecanismos de defensa. Con el tiempo, esta invasión se manifiesta en las hojas como manchas amarillas y oscuras, típicas de la enfermedad.

¿Cómo atacan las bacterias? Imaginemos que las hojas son como una fortaleza con pequeñas puertas que tienden a estar abiertas (son los estomas, hidatodos o, en otros casos, diminutas heridas casi invisibles). Para la bacteria esta es la oportunidad perfecta para colarse. Una vez en contacto con la superficie, liberan herramientas químicas muy potentes (enzimas como pectinasas y celulasas) capaces de debilitar y romper poco a poco la pared celular de la planta. De esta manera consiguen abrirse camino hacia el espacio entre las células, un lugar donde circulan agua, nutrientes y otras moléculas fundamentales para la planta. Una vez dentro, las bacterias no permanecen desprotegidas, y producen una especie de capa viscosa que funciona como escudo que bloquea pequeños canales por donde normalmente circulan los nutrientes, lo que genera un desequilibrio en la planta. Al mismo tiempo, liberan un arsenal de proteínas diseñadas para apagar las alarmas internas

de defensa e incluso provocar la muerte de algunas células, lo que facilita su proliferación.

Conforme la infección progresá, las acciones descritas arriba debilitan los tejidos, principalmente las hojas, en las cuales aparecen zonas amarillentas alrededor de las lesiones (clorosis) y, con el tiempo, manchas oscuras y secas que marcan un daño irreversible (necrosis). Cuando las hojas alcanzan este grado de lesión, su capacidad fotosintética se ve severamente comprometida, por lo que la planta comienza a apagarse desde adentro. A ello se suma la acumulación interna de la capa viscosa que la bacteria continúa produciendo; es como si sus venas se obstruyeran lentamente hasta dejarla sin oxígeno ni alimento. Al final, el resultado es inevitable: en la mayoría de los casos, provoca la muerte de la planta por un colapso total de su sistema. Cada paso está finamente

calculado; las bacterias deben usar la estrategia adecuada en el momento justo para lograr invadir con éxito y debilitar a toda la planta. Lo curioso es que este modo de entrada es compartido por distintos “familiares” de la bacteria del género *Xanthomonas*.

Según investigaciones recientes (Osdaghi, 2021), existen al menos cuatro linajes distintos de *Xanthomonas* responsables de esta enfermedad: *X. euvesicatoria* pv. *euvesicatoria*, *X. euvesicatoria* pv. *perfornans*, *X. hortorum* pv. *gardneri* y *X. vesicatoria*. Estos patógenos no solo afectan al chile (*Capsicum spp.*) y al tomate (*Solanum lycopersicum*), sino que también pueden infectar a otras plantas silvestres y cultivadas, lo que complica aún más su control. A pesar de que todas ingresan de manera parecida, no todas poseen la misma potencia de ataque; algunas son más agresivas que otras. En otras palabras, la planta tiene que lidiar con un grupo de intrusas, cada una con su propio modo de provocar problemas, lo cual dificulta aún más la defensa y el control de la enfermedad.

Durante años, el método más común para enfrentar a la mancha bacteriana ha sido el uso intensivo de pesticidas químicos. No obstante, esta estrategia tiene importantes desventajas, ya que representa un alto costo económico; además, su uso prolongado puede tener consecuencias negativas tanto para la salud humana como para el medio ambiente.

Actualmente, la mancha bacteriana sigue siendo un reto, pero también una oportunidad para transformar la manera en que protegemos nuestros cultivos de interés económico, usando estrategias basadas en el fortalecimiento de las defensas naturales de las plantas, que podrían cambiar el rumbo de esta batalla.

#### DE ENEMIGO A ALIADO

Actualmente, los avances en biotecnología han abierto la posibilidad de transformar a uno de los patógenos más temidos de los cultivos en una herramienta para fortalecer la inmunidad de las plantas. Las bacterias como *Xanthomonas* secretan una variedad de proteínas que les permiten infectar a sus hospederos. Entre ellas se encuentran las harpinas (Hrp), que en

condiciones naturales cumplen un papel negativo, debido a que las bacterias las liberan mediante un mecanismo especializado que opera como una especie de jeringa microscópica para introducir moléculas invasoras y dar inicio al ataque contra la planta.

Sin embargo, lo que resulta dañino bajo el control del patógeno, en pequeñas dosis puede convertirse en un aliado.

Cuando las harpinas se aplican de manera controlada actúan como elicidores. Al ser detectadas, la planta responde reforzando sus tejidos, activando genes defensivos y, en muchos casos, logra resistir la infección sin necesidad de aplicación de pesticidas químicos. En otras palabras, las harpinas funcionan como una especie de “vacuna para plantas”; es decir, una señal que, sin causar enfermedad, prepara a la planta para defenderse con mayor eficacia frente a futuros ataques. Esta dualidad hace de las harpinas un ejemplo fascinante de cómo algo perjudicial puede volverse benéfico. Cuando son usadas por el patógeno, son una herramienta de ataque; aplicadas por el ser humano en forma controlada, se transforman en una estrategia natural, segura y efectiva para proteger los cultivos contra gérmenes.

Lo más interesante es que esta protección puede lograrse de manera sencilla mediante aspersión de las harpinas sobre las plantas, o de forma más especializada, expresándolas directamente en las células vegetales mediante ingeniería genética. A diferencia de otros métodos más agresivos, las harpinas activan la respuesta inmune sin matar las células.

#### CASOS DE ÉXITO EN EL USO DE HARPINAS

Diversos estudios, tanto en México como en el extranjero, han demostrado la eficacia las harpinas bajo condiciones reales de cultivo, posicionándolas como aliadas clave en el manejo de enfermedades vegetales.

Dentro del campo mexicano, en el municipio de Tlapa de Comonfort, Guerrero, investigadores del Departamento de Parasitología Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo evaluaron distintos elicidores bacterianos para combatir el virus del mosaico del tabaco (TMV) en cultivos de tomate. Uno de los tratamientos más efectivos fue el uso del inductor Messenger

Gold®, basado en proteínas harpinas, el cual logró reducir significativamente la concentración del virus y mejorar la calidad de los frutos (Hernández *et al.*, 2020).

En otro esfuerzo destacado, el Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ), con sede en Guadalajara, desarrolló un bioinsumo llamado BioFensa, formulado a partir de proteínas harpinas. En ensayos realizados en invernadero, este producto consiguió disminuir aproximadamente el 53 % de las manchas bacterianas en tomate causadas por *Pseudomonas syringae* pv. *tomato* y resguardar alrededor del 60 % de los cultivos de chile contra *Xanthomonas euvesicatoria*. Además de BioFensa, lograron reducir el impacto de la enfermedad con otros productos como Actigard®, que activa las defensas naturales de la planta a través de un proceso sistémico, y Messenger Gold®, que también provoca reacciones protectoras. Estos hallazgos indican que distintas estrategias basadas en activadores y elicidores de defensa tienen el potencial de robustecer la protección natural de las plantas de forma eficaz y segura (Cuellar *et al.*, 2025), pero los resultados son propios de situaciones controladas y pueden fluctuar dependiendo del manejo del cultivo y de factores ambientales.

Más allá de México, el potencial de las proteínas harpinas también ha sido validado en otros países. En China, investigadores demostraron que la proteína PopW, producida por *Ralstonia solanacearum*, puede activar defensas en plantas de tabaco sin dañar el tejido vegetal, un hallazgo clave para su uso como bioestimulante (Li *et al.*, 2010).

En Finlandia, la proteína harpina de *Pseudomonas syringae* mostró su capacidad para inducir respuestas inmunitarias en varias especies vegetales como frijol, tomate, perejil y *Arabidopsis thaliana*, aunque no en tabaco, lo que sugiere una especificidad según la especie bacteriana (Li *et al.*, 2005). Se ha observado que esta harpinas se une a proteínas específicas en la célula vegetal, lo que probablemente explica su efecto protector.

En Estados Unidos, se descubrió que la bacteria que causa el tizón de fuego en manzanos y perales tiene una proteína harpina llamada HrpN, que interactúa con un receptor de la planta. Al bloquear

este receptor, las plantas se volvieron mucho más resistentes a la enfermedad, una muestra más de cómo los estudios sobre estas proteínas pueden ayudar a proteger los cultivos (Yuan *et al.*, 2021).

Las proteínas harpinas y otros elicidores, según los casos de estudio mencionados previamente, muestran que incluso aquellos agentes que antes veíamos como amenazas pueden transformarse en aliados fuertes para la agricultura. Su habilidad para activar defensas naturales en las plantas sin provocar enfermedad permite que se implementen prácticas más sostenibles, que dependen menos de pesticidas químicos convencionales. Sin embargo, su empleo tiene limitaciones y exige precauciones. Dado que la dosis, el momento de aplicación, las condiciones climáticas y el tipo de cultivo determinan su eficacia, su uso debe hacerse con responsabilidad. A eso se le añade un reto social: el temor y la desconfianza que sienten algunos agricultores al saber que provienen de bacterias patógenas. Superar esta barrera requiere educación, apoyo técnico y una comunicación clara que contribuya a convertir la percepción negativa en confianza hacia estas herramientas.

Si se aplican bajo protocolos científicos rigurosos, los elicidores no solo ofrecen protección frente a patógenos, sino que también contribuyen a la construcción de una agricultura más resiliente, con menor impacto ambiental y mayor capacidad de adaptación frente al cambio climático. Así, lo que alguna vez fue un enemigo se transforma en una herramienta de control, marcando un cambio de paradigma en la forma en que entendemos y manejamos la salud de los cultivos.

## REFRENCIAS

- Ayilara MS, Adeleke BS, Akinola SA *et al.* (2023). Biopesticides as a promising alternative to synthetic pesticides: A case for microbial pesticides, phytosanitarios, and nanobiopesticides. *Frontiers in Microbiology* 14:1040901. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1040901>.
- Bonaterra A, Badosa E, Daranas N *et al.* (2022). Bacteria as biological control agents of plant diseases. *Microorganisms* 10(9):1759. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms10091759>.

Cuellar-Espejel MDS, Quiñones-Aguilar EE, Rincón-Enríquez G *et al.* (2025). Proteínas Hrp como bioinductores para el control biológico de enfermedades bacterianas en plantas de jitomate y chile bajo





© Miguel Ángel Andrade. De la serie *Café Andrade*.

invernadero. *Revista Mexicana de Fitopatología* 43(4):54. DOI: <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2024-25>.

Gowtham HG, Murali M, Shilpa N et al. (2024). Harnessing abiotic elicitors to bolster plant's resistance against bacterial pathogens. *Plant Stress*, 11:100371. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100371>.

Hernández-Santiago R, Vargas-Hernández M y Zamora-Macorra EJ (2020). Evaluación de inductores de resistencia al TMV en tomate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 11(2). <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i2.2072>.

Kumar A, Bilal M, Santoyo G and Panwar JS (Eds.) (2024). *Biocontrol agents for improved agriculture*. Academic Press.

Li CM, Haapalainen M, Lee J et al. (2005) Harpin of *Pseudomonas syringae* pv. *phaseolicola* harbors a protein binding site. *Molecular Plant-Microbe Interactions* 18(1):60-6. DOI: <https://doi.org/10.1094/mpmi-18-0060>.

Li JG, Liu HX, Cao J et al. (2010) PopW of *Ralstonia solanacearum*, a new two-domain harpin targeting the plant cell wall. *Molecular Plant Pathology* 11(3):371-81. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2010.00610.x>.

Osdaghi E, Jones JB, Sharma A et al. (2021). A centenary for bacterial spot of tomato and pepper. *Molecular Plant Pathology* 22(12):1500. DOI: <https://doi.org/10.1111/mpp.13125>.

Yuan X, Hulin MT and Sundin GW (2021) Effectors, chaperones, and harpins of the Type III secretion system in the fire blight pathogen *Erwinia amylovora*: a review. *Journal of Plant Pathology* 103(Suppl. 1):25-39. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42161-020-00623-1>.

**María del Sol Cuéllar-Espejel**

**Gabriel Rincón-Enríquez**

**Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco**

[grincon@ciatej.mx](mailto:grincon@ciatej.mx)



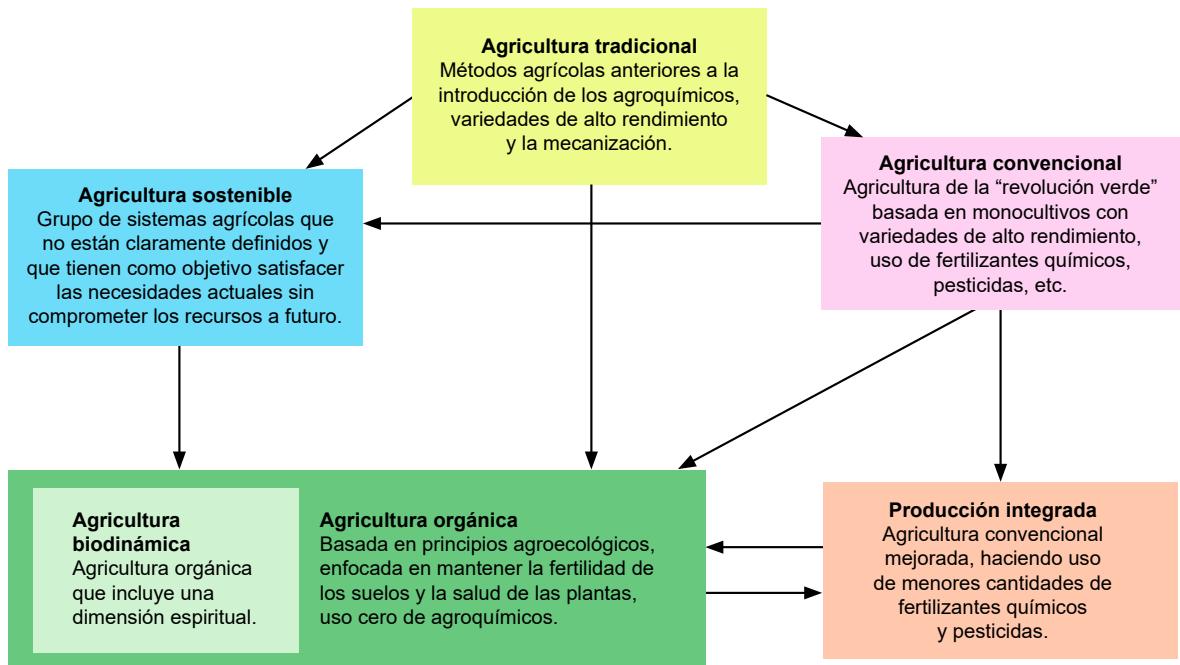
© Miguel Ángel Andrade. De la serie *Café Andrade*.

# De desecho a nutriente: el frass de *Hermetia illucens*

**Ezequiel Licea Rangel  
Benito Parra Pacheco**

La agricultura es una actividad humana indispensable que requiere agua y suelo en grandes cantidades. El crecimiento de la población, junto con las malas prácticas agrícolas, ha provocado el incremento de áreas de cultivo y la explotación desmedida de los recursos naturales, ocasionando problemas de disponibilidad de recursos y degradación de los suelos (Velázquez *et al.*, 2022). Una nota del periódico *La Jornada* señala que solamente en México, entre los años 2005 y 2020, se perdieron alrededor de 2.5 millones de hectáreas de vegetación natural debido al cambio de uso de suelo (Enciso, 2022). Sin embargo, al tratarse de una fuente periodística, no se especifican las condiciones de medición utilizadas para realizar estas estimaciones. En estados como Veracruz, se observó entre 1989 y 2015 una reducción del 57 % de la vegetación endémica reemplazada por tierras de cultivo para satisfacer la demanda creciente de alimentos (Hernández *et al.*, 2022). Por lo tanto, es necesario explorar nuevos modelos de producción en terrenos cada vez más reducidos.

Para este objetivo, existen múltiples modelos de producción agrícola, los cuales están interrelacionados debido a que todos se derivan de la agricultura tradicional, como se muestra en la Figura 1. Si bien pueden presentar similitudes, cada uno se ha adaptado y transformado de



**Figura 1.** Modelos de agricultura. Elaboración propia con base en Mejía (2022).

acuerdo con sus principios y objetivos, mostrando desde diferencias sutiles hasta otras muy notorias. Esto es lo que permite su aplicación en diferentes entornos y contextos.

En este caso, nos centraremos en los distintos niveles de impacto ambiental que presenta cada sistema, siendo la agricultura sostenible la que busca mantener o aumentar la productividad para suprir la demanda alimenticia actual mediante la reducción o eliminación del uso de fertilizantes sintéticos, priorizando alternativas como los fertilizantes orgánicos. Esto se complementa con la aplicación de nuevas prácticas agrícolas para que, en conjunto, se cause el menor impacto posible en los suelos y mantos acuíferos (Holmes *et al.*, 2021). Este modelo de producción es clave en la búsqueda de la seguridad alimentaria, el cuidado y conservación del medio ambiente, así como el desarrollo económico, siendo estos algunos de los objetivos de la agenda 2050.

En este contexto, dentro de la agricultura sostenible existen los sistemas de cultivos hidropónicos que utilizan sustratos para el desarrollo de las

plantas. Los sustratos son materiales sólidos que brindan soporte a las raíces, permiten la correcta aireación y favorecen la retención de agua, así como nutrientes necesarios para el crecimiento vegetal. Su uso ha ganado popularidad con el paso de los años, principalmente porque los cultivos en suelo pueden llegar a presentar vulnerabilidades debido a la pérdida de su calidad física y química. Al emplear sustratos alternativos, no solo se evita la degradación del suelo, sino que se posibilita la producción e intensificación de los cultivos en diversas regiones del mundo (Rocha *et al.*, 2022). Para lograrlo, es fundamental conocer las características fisicoquímicas de los sustratos, ya que estas influyen directamente en el desarrollo de la planta durante sus distintas etapas fenológicas. Algunos de los materiales comúnmente utilizados en cultivos hidropónicos son la fibra de coco, tezontle, peat moss, carbón vegetal e hidrogeles, entre otros.

#### MOSCA SOLDADO NEGRO

La mosca soldado negro (*Hermetia illucens*) es un díptero cuya fase larvaria ha captado el interés de los

científicos en años recientes debido a su composición rica en proteínas, su capacidad para alimentarse de distintos residuos orgánicos, y su capacidad adaptativa a diferentes condiciones climáticas. Además, ha sido propuesta como una alternativa para dar tratamiento a los residuos del sector primario y secundario (Naser *et al.*, 2023).

Entre los residuos que puede consumir se encuentran frutas, vegetales, excrementos y animales en descomposición. Durante su fase larvaria, cada individuo puede ingerir entre 25 y 500 mg de materia fresca por día; agregado a esto, presenta una tasa de bioconversión que varía entre 0.1 y 0.2, lo que significa que puede generar entre 100 y 200 gramos de biomasa por cada kilogramo de alimento consumido (Maquart *et al.*, 2019). Sin embargo, a pesar de ser consideradas como una opción prometedora para la sustentabilidad a futuro debido a su eficiencia en la transformación de residuos, diversos estudios han demostrado que *Hermetia illucens* tiene la capacidad de bioacumular metales pesados como cadmio (Cd), plomo (Pb) y zinc (Zn). Esta característica puede limitar su uso como fuente de alimento para animales, reduciéndolo a peces y aves de corral, dependiendo de la legislación (Quinde, 2025).

El frass es un residuo generado por diferentes especies de insectos que se compone de los restos obtenidos después de separar las larvas del sustrato donde se desarrollaron, una mezcla de alimento no consumido (semillas, huesos, pelo, etc.), excretas larvales y mudas de piel. Su composición varía según la alimentación y la especie del insecto criado; sin embargo, se ha reportado que posee altos niveles de nitrógeno, fósforo y potasio (N – P – K).

Estos elementos desempeñan un papel fundamental en la nutrición vegetal, influyendo directamente en el desarrollo físico y químico de las plantas. Su uso como fertilizante orgánico ha sido explorado en cultivos como albahaca (*Ocimum basilicum*), llantén menor (*Plantago lanceolata L.*) y achicoria (*Cichorium intybus L.*), entre otras, dando como resultado común el aumento en la biomasa de los cultivos establecidos en suelos adicionados

con frass; sin embargo, en dichos experimentos no se evaluó la actividad microbiana ni la interacción entre los microorganismos presentes en el frass con la microbiota del suelo. Además, el frass de *Hermetia illucens* puede llegar a contener metales pesados. Si bien la mayoría de estos se acumulan en las larvas, una pequeña cantidad queda almacenada en sus excretas. Esta situación aumenta la necesidad de estudios sobre el frass que podrían apoyar en la generación de normativas técnicas para su uso agrícola, ya sea como fertilizante por sí solo o adicionado con otros materiales. (Lomonaco *et al.*, 2024).

## CONCLUSIÓN

El frass de insecto, en este caso *Hermetia illucens*, ha mostrado tener capacidades nutricionales para los cultivos. Su inclusión en la agricultura es una oportunidad para impulsar un cambio en el modelo actual. Lo que no solamente permitiría mantener el creciente nivel de producción, sino que también ayudaría a reducir la dependencia de fertilizantes sintéticos y las afectaciones al medio ambiente que estos causan a largo plazo. Sin embargo, aún hacen falta más estudios en profundidad sobre su aplicación en distintos contextos con el fin de generar evidencia científica que respalde la seguridad de su uso. Aunque se sabe que las larvas almacenan una parte de los metales pesados que consumen, aún no se conoce la proporción exacta que se almacena en sus excretas, ni las afectaciones que podrían causar a los suelos y mantos acuíferos. Tampoco se tiene mucha información sobre la interacción entre diferentes tipos de cultivos y los microorganismos presentes en el frass.

La investigación sobre el frass en México aún se encuentra en una etapa temprana, por lo que promover estudios interdisciplinarios que integren enfoques microbiológicos, ambientales y agronómicos puede ser una estrategia viable para promover su establecimiento como una herramienta en la agricultura.



© Miguel Ángel Andrade. De la serie *Café Andrade*.



© Miguel Ángel Andrade. De la serie *Café Andrade*.

## R E F E R E N C I A S

Enciso A (2022, 3 de febrero). Por cambio de uso de suelo, México perdió 2.5 millones de hectáreas. *La Jornada*. Recuperado de: <https://www.lajornadamaya.mx/nacional/189372/por-cambio-de-uso-de-suelo-mexico-perdio-2-5-millones-de-hectareas>.

Hernández-Pérez E, García-Franco JG, Vázquez G y Cantellano de Rosas E (2022). Cambio de uso de suelo y fragmentación del paisaje en el centro de Veracruz, México (1989-2015). *Madera y Bosques* 28(1):1-22.

Holmes I, Bitrán D, Zambrana T y Ladrón de Guevara J (2021). *Hacia una agricultura sostenible y resiliente en América Latina y el Caribe: Análisis de siete trayectorias de transformación exitosas*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Lomonaco G, Franco A, De Smet J et al. (2024). Larval frass of *Hermetia illucens* as organic fertilizer: Composition and beneficial effects on different crops. *Insects* 15(4):293. DOI: <https://doi.org/10.3390/insects15040293>.

Maquart PO, Wallace PA, Nyameasem JK et al. (2019). Impact of black soldier fly larval meal on growth performance, apparent digestibility, hematological and blood chemistry indices of guinea fowl starter keets under tropical conditions. *Tropical Animal Health and Production*

49(1):1163-1169. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11250-017-1312-x>.

Mejía Guerra PA (2022). *Valoración del uso combinado de mezclas de materiales orgánicos y biofertilización con microorganismos en cultivo sin suelo*. Tesis doctoral, Universidad de Almería.

Naser El Deen S, van Rozen K, Elissen H et al. (2023). Bioconversion of different waste streams of animal and vegetal origin and manure by black soldier fly larvae *Hermetia illucens* L. (Diptera: Stratiomyidae). *Insects* 14(2):204. DOI: <https://doi.org/10.3390/insects14020204>.

Quinde Pérez AE y Roldán Domínguez JE (2025). *Producción y valoración nutricional de la harina de larva de mosca soldado negra (*Hermetia illucens*)*. Tesis de licenciatura, Universidad de Cuenca.

Rocha GAO, Vergel SJN, Arias LG et al. (2022). La técnica del cultivo sin suelo y su contribución al mejoramiento tecnológico de la agricultura bajo cubierta: un análisis bibliométrico. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinaria* 6(6):7053-7074.

Velázquez-Chávez LDJ, Ortiz-Sánchez IA, Chávez-Simental JA et al. (2022). Influencia de la contaminación del agua y el suelo en el desarrollo agrícola nacional e internacional. *TIP: Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas* 25(1):1-13.

**Ezequiel Licea Rangel**  
**Benito Parra Pacheco**  
**Universidad Autónoma de Querétaro**  
[benito.parra@uag.mx](mailto:benito.parra@uag.mx)

# Sin semillas, pero con vida: la clonación de pinos por estacas

Yaiza Sabrina Suárez Hernández

Los pinos son árboles que todos han visto alguna vez: altos, de copa triangular, con sus características hojas similares a agujas (acículas) y piñas (estróbilos). Pertenecen al género *Pinus* y son probablemente las coníferas más reconocibles en todo el mundo. Sus ancestros aparecieron hace aproximadamente 300 millones de años, durante el período Carbonífero (Hilton *et al.*, 2003), cuando los dinosaurios aún no existían, pero el grupo de pinos, como lo conocemos hoy, comenzó a diversificarse durante el Cretácico Inferior y compartió el planeta con los últimos dinosaurios.

Estos árboles se distinguen por características como su corteza, que puede variar desde tonos rojizos hasta grises, y sus acículas, que crecen en grupos de 2 a 5, dependiendo de la especie, y pueden medir desde unos pocos centímetros hasta más de 20 cm de largo.

México es un verdadero paraíso para los pinos, también conocido como centro de diversificación. Gernandt y Pérez (2014) señalan que, de las aproximadamente 120 especies que existen en el mundo, el 47 % de ellas (57 especies) se encuentran en nuestro país! Esta extraordinaria diversidad ha convertido a México en un centro crucial para la evolución de estos árboles. Algunas especies mexicanas, como el *Pinus patula*, han demostrado ser tan valiosas que se cultivan comercialmente en plantaciones forestales alrededor del mundo.

Entre la gran variedad de pinos mexicanos, cuatro especies han captado especialmente la atención de los científicos: el pino blanco (*Pinus pseudostrobus*), el pino prieto (*P. greggii*), el pino de las alturas (*P. hartwegii*) y el pino montezuma (*P. montezumae*). Estos árboles son fundamentales en sus ecosistemas: proporcionan alimento y refugio a numerosas especies de aves, insectos y hongos. Sus raíces ayudan a prevenir la erosión del suelo, y sus copas crean microclimas que permiten el desarrollo de una variada vegetación. Han desarrollado adaptaciones sorprendentes: algunas especies, como *P. canariensis* y *P. hartwegii* Lindl., necesitan el calor de los incendios forestales para propiciar la fecundación de sus semillas, garantizando así la regeneración del bosque. Otros pinos, entre ellos *P. hartwegii*, pueden crecer en altitudes superiores a los 4,000 metros, donde las condiciones son extremadamente duras.

Actualmente, varios bosques de pinos enfrentan amenazas como la tala ilegal, los incendios forestales no naturales y el cambio climático. La conservación de estas especies es crucial para mantener la biodiversidad y los servicios ambientales que proporcionan.

#### LA PROPAGACIÓN DE LOS PINOS: ¿SEMIILLAS O CLONES?

Cuando se piensa en cultivar pinos, surge la interesante disyuntiva: ¿se deberían usar semillas o crear copias exactas de los mejores árboles?

La naturaleza ofrece el método tradicional: las semillas. Este proceso de reproducción sexual ha funcionado durante millones de años, pero presenta un desafío para las plantaciones comerciales. Al igual que los hijos de una familia no son idénticos entre sí, los pinos que crecen a partir de semillas pueden resultar muy diferentes unos de otros: algunos crecerán altos y robustos, mientras que otros podrían ser más bajos o delgados; incluso la calidad de su madera puede variar significativamente.

Por otro lado, existe la propagación vegetativa, que se define como la producción de plantas con características genéticas idénticas a la planta madre y se puede lograr mediante técnicas de injerto,

enraizamiento de estacas o cultivo *in vitro*. Imagina que encontramos un pino excepcional: alto, fuerte, resistente a enfermedades y con madera de primera calidad. ¿No sería fantástico poder reproducir exactamente esas características? Rivera-Rodríguez y colaboradores. (2016) explican que esto es posible tomando una parte del árbol –ya sea del tallo, la raíz o una hoja– y cultivándola bajo condiciones específicas hasta que desarrolle sus propias raíces y brotes.

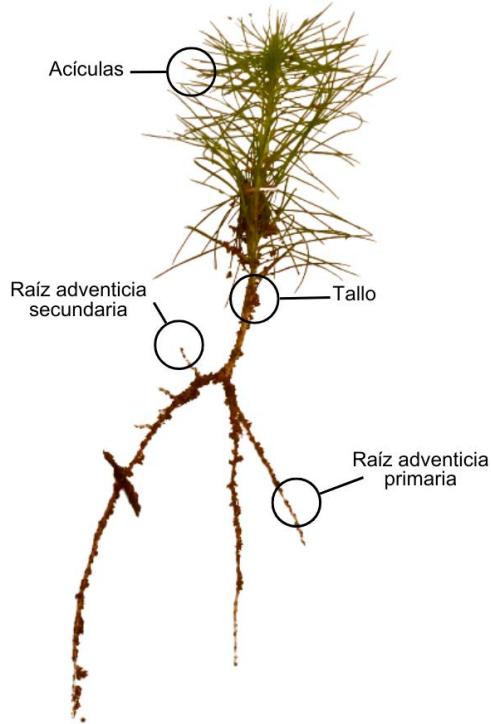
¿Por qué es esto tan importante? Diversos estudios señalan que esta técnica permite maximizar el rendimiento y asegurar la uniformidad en las plantaciones comerciales. Además, como destacan Rivera-Rodríguez y colaboradores. (2016), citando a Poupart y colaboradores. (1994), es posible seleccionar árboles con características especialmente deseables, como resistencia a enfermedades o formas específicas de crecimiento.

#### HORMONAS EN ACCIÓN: EL PAPEL DEL ÁCIDO INDOL-3-BUTÍRICO (AIB)

Las estacas, para sobrevivir, requieren generar un sistema radicular (Figura 1), conformado por raíces adventicias y que puede ser inducido por factores endógenos como las fitohormonas, y exógenos como las auxinas sintéticas.

Las auxinas son un grupo de reguladores del crecimiento que incluyen compuestos naturales y sintéticos con un impacto significativo en el desarrollo de las raíces (Bellini *et al.*, 2014). Dentro de estas, el ácido indol-3-butírico (AIB) es uno de los más utilizados en la propagación de pinos, debido a su estabilidad y eficacia en el transporte dentro de la planta (Stuepp *et al.*, 2017); su aplicación acelera la iniciación de raíces adventicias y mejora la uniformidad del enraizamiento (Bautista-Ojeda, 2022).

Y aunque las auxinas son las principales promotoras del enraizamiento, otras fitohormonas también influyen en este proceso. Las citoquininas, en bajas concentraciones, favorecen la formación de raíces en *Pinus radiata*. Por otro lado, el etileno puede actuar de manera sinérgica o antagónica con las auxinas, dependiendo del contexto. El ácido abscísico (ABA), en la mayoría de los casos, inhibe la formación de



**Figura 1.** Partes de una estaca de pino enraizada. Foto: Yaiza Sabrina Suárez Hernández.

raíces adventicias, mientras que las giberelinas tienen efectos variables según la especie y las condiciones ambientales (Bellini *et al.*, 2014). Además, los jasmonatos, brassinosteroides y estrigolactonas –fitohormonas– participan en la regulación del desarrollo radicular a través de interacciones complejas con las auxinas. Entonces, el AIB se utiliza frecuentemente en la clonación de pinos mediante la inmersión de las superficies de corte en soluciones de diferentes concentraciones. Por ejemplo, Sedaghathoor *et al.* (2016) reportaron que en *Pinus mugo*, el porcentaje de enraizamiento aumentó del 14 % sin tratamiento al 55 % con la aplicación de AIB y ácido naftalenacético (ANA).

En *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, Henrique *et al.* (2006) encontraron que el AIB es más efectivo que el ANA, con una dosis óptima que alcanzó un 95,31 % de enraizamiento. Por otra parte, Bautista-Ojeda *et al.* (2022) reportaron que, en *Pinus patula*, la aplicación de AIB en solución resultó en más del 70 % de enraizamiento en estacas de plantas de 15 a 18 meses de edad, cuando se combinó con fertilización adecuada en invernadero.

A pesar de su eficacia en muchas especies, el AIB no siempre garantiza el enraizamiento. En *Pinus*

*leiophylla*, Cuevas-Cruz y colaboradores. (2015) encontraron que la aplicación de esta auxina no aumentó significativamente la probabilidad de enraizamiento, aunque sí estimuló la producción de raíces primarias. Esto resalta la importancia de considerar las características específicas de cada especie al diseñar estrategias de propagación vegetativa.

#### FACTORES CLAVE PARA UN BUEN ENRAIZAMIENTO

La capacidad de formar raíces en las estacas está estrechamente relacionada con factores genéticos de la planta madre, por lo que se adjudica en parte a los procesos bioquímicos y fisiológicos que ocurren durante el desarrollo y que, en última instancia, se ven afectados por las diferencias genéticas dentro y entre especies. Por ejemplo, los árboles del género *Eucalyptus* suelen tener un enraizamiento muy rápido y vigoroso, a diferencia de los del género *Pinus*.

Sin embargo, otras características determinantes para el enraizamiento de estacas son el uso de tejido juvenil, la concentración endógena de hormonas vegetales, las reservas de carbohidratos y el grado de lignificación del tallo, también relacionadas con la posición de la estaca en la planta madre, así como con la nutrición de esta (Steffens y Rasmussen, 2016). Ma y colaboradores. (2021) mencionan que el envejecimiento de la planta madre en especies de *Pinus* afecta notablemente la capacidad de enraizamiento durante la propagación vegetativa, ya que los tejidos de ramas adultas presentan una menor aptitud para formar raíces en comparación con el material juvenil, fenómeno que se debe a cambios fisiológicos y moleculares asociados a la transición de fase juvenil a adulta, regulada por factores como los genes MADS-box, que median el envejecimiento y la competencia reproductiva en pinos, acelerando la perdida de capacidad regenerativa en tejidos maduros.

Controlar el ambiente de enraizamiento en vivero o invernadero es crucial para mejorar el éxito en la propagación vegetativa, particularmente en especies del género *Pinus*, que requieren condiciones específicas para el desarrollo de raíces adventicias. Las estrategias



**Figura 2.** Planta madre de pino. Foto: Yaiza Sabrina Suárez Hernández.

incluyen el control de factores como la temperatura, la humedad relativa, la luminosidad y la ventilación.

El sustrato utilizado en el enraizamiento también juega un papel relevante en el éxito de la propagación de estacas de *P. patula*. Influye en la producción de raíces, tanto en número como en longitud (Cuevas-Cruz *et al.*, 2015). Sedaghathoor y colaboradores. (2016) analizaron cómo distintos sustratos afectan el enraizamiento de *Pinus mugo*, concluyendo que la elección de un sustrato adecuado mejora considerablemente la formación de raíces. Sustratos con buena retención de humedad y adecuada aireación permiten un equilibrio ideal para el desarrollo radicular, favoreciendo la absorción de nutrientes y facilitando el crecimiento de las raíces en estacas jóvenes.

#### ¿POR QUÉ CLONAR PINOS? APPLICACIONES Y BENEFICIOS

Dada la importancia ecológica y productiva de los pinos, así como su amplia distribución y uso en plantaciones forestales, se ha incrementado el interés por desarrollar métodos eficientes de propagación vegetativa. La clonación mediante enraizamiento de estacas se presenta como una estrategia prometedora

para la producción masiva de material genético selecto, permitiendo conservar características deseables de las plantas madre (Figura 2) y reducir el tiempo necesario para obtener material de plantación de alta calidad.

Este método ofrece ventajas significativas, como la uniformidad genética de las plantas clonadas y un mayor control sobre la calidad del material de propagación. Sin embargo, el éxito del enraizamiento depende de múltiples factores, incluidas la edad de la planta madre y la aplicación de reguladores del crecimiento. La optimización de estos factores es clave para maximizar la supervivencia y el desarrollo radicular de las estacas, asegurando su viabilidad en viveros y su posterior establecimiento en campo.

#### DESAFÍOS Y FUTURO DE LA CLONACIÓN DE PINOS

En México, la propagación vegetativa de pinos está cobrando cada vez más relevancia en programas de mejoramiento genético y reforestación. Sin embargo, aún enfrenta desafíos que limitan su implementación a gran escala. La baja tasa de enraizamiento en algunas especies, los costos asociados a la aplicación de reguladores de crecimiento y la infraestructura necesaria son factores que dificultan su adopción generalizada. Además, la edad y condición de la planta madre, la lignificación del tejido y las condiciones ambientales influyen en la capacidad de las estacas para desarrollar raíces, lo que hace necesario continuar investigando estrategias que optimicen el proceso.

A pesar de estas limitaciones, la investigación en biotecnología y fisiología vegetal ha permitido avances significativos para mejorar la eficiencia del enraizamiento. El uso combinado de reguladores de crecimiento, la optimización de sustratos y el desarrollo de técnicas como el cultivo *in vitro* han abierto nuevas oportunidades para la clonación de pinos. Estos avances no solo favorecen la producción de material vegetal de alta calidad, sino que también contribuyen a la conservación y restauración de los bosques. Con el avance científico, la clonación de pinos se consolida como una estrategia fundamental para elevar la productividad forestal y mitigar los

efectos del cambio climático mediante la generación de árboles mejor adaptados y más resistentes. En este sentido, resulta indispensable vincular el conocimiento generado en los laboratorios con su aplicación práctica en campo, integrándolo en políticas forestales, programas de conservación y estrategias de manejo genético que promuevan la sustentabilidad de los ecosistemas forestales.

## R E F E R E N C I A S

- Bautista-Ojeda GI, Vargas-Hernández JJ, Jiménez-Casas M y López-Peralta MCG (2022). Manejo de planta y aplicación de AIB en el enraizado de estacas de *Pinus patula*. *Madera y Bosques* 28(1). DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2022.2812060>.
- Bellini C, Pacurar DI and Perrone I (2014). Adventitious roots and lateral roots: Similarities and differences. *Annual Review of Plant Biology* 65:639-666. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050213-035645>.
- Challenger A y Soberón J (2008). Los ecosistemas terrestres. En Soberán J, Halffter G y Llorente-Bousquets J (Eds.), *Capital natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad* (pp. 87-108). CONABIO.
- Cuevas-Cruz JC, Jiménez-Casas M, Jasso-Mata J et al. (2015). Propagación asexual de *Pinus leiophylla* Schiede ex Schltdl. et Cham.
- Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 21(1):81-95. DOI: <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.08.033>.
- Hilton J, Wang S, Tian B and Li C (2003). Evidence for conifer origins and early evolution from the late palaeozoic cathaysian flora of south east asia. *Acta Hortic* 615:59-65. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2003.615.3>.
- Ma J, Chen X, Song Y et al. (2021). MADS-box transcription factors MADS11 and DAL1 interact to mediate the vegetative-to-reproductive transition in pine. *Plant Physiology* 187(1):247-262. DOI: <https://doi.org/10.1093/plphys/kiab250>.
- Rivera-Rodríguez MO, Vargas-Hernández JJ, López-Upton J et al. (2016). Enraizamiento de estacas de *Pinus patula*. *Fitotecnia Mexicana* 39(4):385-392. DOI: <https://acortar.link/vT0ZMO>.
- Sedaghathoor S, Kayghobadi S and Tajvar Y (2016). Rooting of mugo pine (*Pinus mugo*) cuttings as affected by IBA, NAA and planting substrate. *Forest Systems* 25(2):1-4. DOI: <https://doi.org/10.5424/fs/2016252-09087>.
- Steffens B and Rasmussen A (2016). The physiology of adventitious roots. *Plant Physiology* 170(2):603-617. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.15.01360>.
- Stuepp CA, Wendling I, Trueman SJ et al. (2017). The use of auxin quantification for understanding clonal tree propagation. *Forests* 8(1):1-15. DOI: <https://doi.org/10.3390/f8010027>.

**Yaiza Sabrina Suárez Hernández**  
**Universidad Autónoma Chapingo**  
**División de Ciencias Forestales**  
**[yaizasabrinash@gmail.com](mailto:yaizasabrinash@gmail.com)**



© Miguel Ángel Andrade. De la serie *Café Andrade*.



# ¿El Códice Masewal es un verdadero códice?

Jorge Alberto **Venegas-Díaz**

El Códice Masewal es un documento que fue presentado en el Centro de Formación *Kaltaixpetaniloyan* (La casa donde se abre el espíritu) el 15 de mayo de 2022 en Cuetzalan del Progreso, Puebla. Dio inicio a la presentación Paulina Garrido Bonilla, presidenta, en esa fecha, de la Unión de Cooperativas Tosepan Titataniske. Se hizo énfasis en que el Códice muestra la cosmovisión de la comunidad, además de ser un plan de vida y un proyecto educativo. Este plan de vida está redactado en náhuatl (masewalkopa) y español. Siguiendo la más pura tradición mesoamericana viene acompañado de murales. Este es un rasgo muy importante, pues los códices mesoamericanos tienen una escritura iconográfica. Es una obra colectiva coordinada por Eckart Boege Schmidt, Luis Enrique Fernández Lomelín y los Colectivos de la Unión de Cooperativas Tosepan Titataniske. El Códice está dividido en dos partes. La primera se llama *Tomasewalyot* (Nuestro ser masewal) / *Tomasewalnemilis* (Nuestra forma de vida masewal). Contiene la cosmovisión de la comunidad, sus principios, sus valores, los atributos del ser masewal para avanzar, crecer y mejorar sus condiciones de vida, que son la base de la vida buena (*yeknemilis*). Wendell Bell (2018) sostiene que para determinar cómo diseñar un futuro deseable o preferible es indispensable hacer juicios de valor que implican una escala de valores. Este elemento es precisamente el que establece el Códice Masewal en su primera parte.

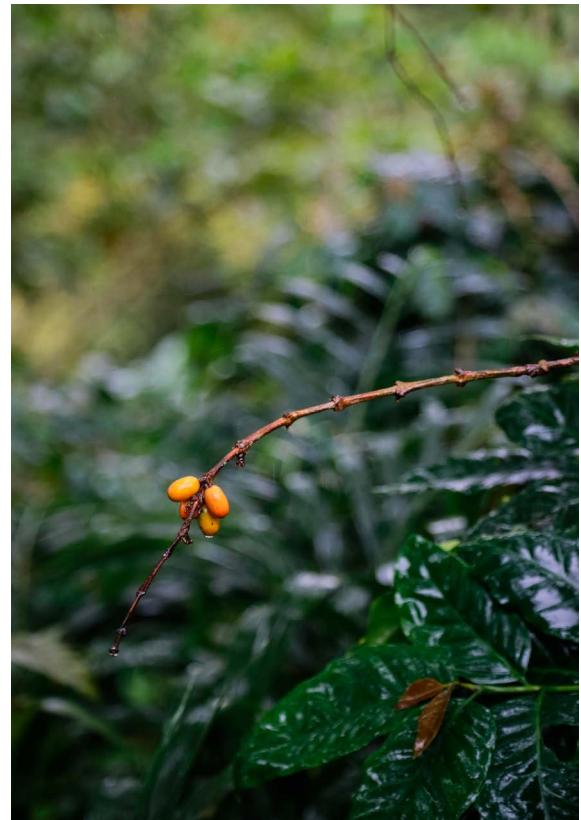
La segunda parte del Código Masewal se llama *Tikochitah tisentekiti ome powal ximit* (Soñando los próximos cuarenta años). Establece líneas estratégicas del plan de vida y programas para el florecimiento del territorio *masewal-tutunaku-mestizo Yeknemilis-Xa tlan latamat* en el siglo XXI. Es el plan de vida estratégico 2017-2057. Las líneas estratégicas que establece el Código Masewal (p.8, parte 2) son las siguientes:

- I. Derechos culturales y territoriales masewal, tutunaku y mestizo.
- II. Identidad cultural y cuidado de nuestras lenguas.
- III. Educación identitaria, comunicación y la vida buena (*yeknemilis/xa tlan latamat*).
- III. Procesos de gobernanza y buen gobierno.
- IV. Autonomía financiera y economía solidaria del *yeknemilis*.
- V. Cuidado de la tierra y el agua respetando la vida y la cultura.
- VI. Soberanía y seguridad alimentaria.
- VII. Pueblo, entorno y cuerpo sano: la promoción integral de la salud, con las familias y comunidades de la región.
- VIII. Autonomía energética.
- IX. Hogar en armonía.

Este documento se describe a sí mismo de esta manera (parte 1, p.7):

El Código (*amaix*) o plan de vida es una guía ampliamente discutida y consensuada que tiene en su corazón a la vida buena (el *yeknemilis*) y representa la memoria de los valores masewal vigentes. El *yeknemilis* resume tanto principios y valores ancestrales de solidaridad comunitaria, espiritualidad, como parte integral de la naturaleza, relación social e intercambio económico solidario, así como aquellos principios surgidos de la experiencia de la organización cooperativista para una economía no extractivista.

En el contexto de este documento la palabra masewal hace referencia a la población nahua y totonaca que pertenece a los Colectivos de la Unión de



© Miguel Ángel Andrade. De la serie *Café Andrade*.

Cooperativas Tosepan Titataniske y los de la región. Sin embargo, es necesario recalcar que no se trata de un plan cerrado para estos pueblos originarios, sino que busca ser un referente para los demás pueblos originarios y equiparables. Va todavía más allá al declarar que es un “plan para el florecimiento regional” aplicable no nada más para los masewal, sino también para los “mestizos que estén de acuerdo con nosotras y nosotros” (parte 1, p. 6).

La pregunta específica que se plantea en este artículo de divulgación consiste en determinar si se trata de un verdadero código o no.

Siguiendo la exposición de Pardo y colaboradores (2002), por código se debe entender un libro manuscrito en diversos formatos como lo es en tira, biombo, rollo, lienzo u hoja, sea sobre papel hecho a base de fibras vegetales o sobre piel curtida de venado.

En estos libros la escritura era en base a imágenes (iconográfica) que podían ser interpretadas por personas provenientes de diferentes lenguas y culturas. Al parecer, la forma más avanzada lo alcanzó la escritura maya, que tenía antecedentes. Existen dos



© Miguel Ángel Andrade. De la serie *Café Andrade*.

teorías al respecto. Una propuesta por Prem (1971) y Justeson (1986) que sostiene una escritura ancestral única que es la olmeca. Otra teoría (Marcus, 2006) sostiene un origen múltiple, un sistema de escritura zapoteca temprana y otra la ístmica temprana, de la que deriva el maya.

Se cuenta con dieciocho códices precolombinos. La mayor parte son calendáricos, pero hay históricos y genealógicos. Respecto a algunos de ellos hay dudas si eran prehispánicos o coloniales como el Códice Borbónico, Tonamatl de Aubin y Manuscrito Aubin Núm. 20. Existen códices de origen náhuatl, mixteco y maya. A los sabios (*tlamatini* en náhuatl) que se dedicaban a la escritura se les decía tlacuilo (*tlacuiloque* en plural). Eran pintores y lectores de los códices. Ya en la época virreinal también se confeccionaron códices, de manera especial los elaborados por comunidades indígenas en procesos judiciales para defender sus derechos, como pruebas escritas (Pardo *et al.*, 2002).

Uno de los elementos relevantes de todos los códices son las imágenes y los mensajes importantes que transmitían, sea en el aspecto de sus calendarios que regían sus vidas, su historia, o como en la época virreinal, para defender sus derechos. En el caso del Códice Masewal conserva la tradición de contener imágenes, además de textos en náhuatl y en español.

Podría parecer que el Códice Masewal no guarda ninguna relación con los códices mesoamericanos

como el Códice Borgia y por lo tanto no sería adecuado nombrarlo bajo el título de códice, sobre todo porque el Códice Masewal podría parecer un simple plan de vida.

Respecto a esta observación, cabe señalar que una de las investigaciones más sobresalientes sobre este tema fue presentada por la Dra. Ethelia Ruiz Medrano. Dada la importancia de esta investigación, fue publicada por la Universidad de Colorado en 2010. Por desgracia, no ha sido publicada en español. Se trata del libro *Mexico's Indigenous Communities. Their Lands and Histories, 1500-2010*. En este libro, la doctora Ruiz Medrano demuestra que sí hay un vínculo directo entre los códices mesoamericanos prehispánicos, los confeccionados durante el virreinato y los elaborados durante el México independiente, por razones que se exponen a continuación.

Los códices prehispánicos son tomados como pruebas históricas. Los códices hechos en tiempo del virreinato y con anterioridad fueron tomados como pruebas plenas en contiendas judiciales. Este elemento de prueba judicial continuó durante el México independiente e incluso llegó a los tribunales agrarios del siglo XX. La tradición iconográfica de los pueblos prehispánicos fue conservada en los códices confeccionados durante el virreinato, y esta tradición continúa hasta hoy en día en algunos pueblos originarios que conservan estos documentos de gran valor y antigüedad. Los códices efectuados durante el virreinato, sobre todo los que se usaban en disputas legales por el territorio, incluían la historia de la comunidad durante siglos. Estos documentos contenían palabras escritas con letras del alfabeto latino, pero en náhuatl, y en muchas ocasiones la iconografía heredada de tiempos prehispánicos, también con palabras en español. Este tipo de documentos llegaron a ser utilizados ya en tiempos del México moderno por disputas territoriales como instrumentos probatorios. El Códice Masewal es un documento que no solo contiene murales, siguiendo la tradición iconográfica de los códices mesoamericanos prehispánicos, sino que hace constante referencia al territorio, su historia y su defensa, así como su vinculación sagrada con el pueblo, además de expresar con

claridad una cosmovisión determinada, elementos que lo aproximan con los códices confeccionados durante el virreinato. Los códices mesoamericanos prehispánicos manifestaban cosmovisiones a través de un lenguaje iconográfico, dato esencial que se encuentra plasmado en el Códice Masewal. Por todas estas razones, se puede concluir que el Códice Masewal contiene todos los elementos para calificarlo de un verdadero códice mesoamericano.

Contra estas conclusiones se podría argumentar que la palabra códice debería reservarse solo para los documentos confeccionados antes de la invasión castellana; sin embargo, en la misma tradición castellana, a los documentos elaborados por los pueblos originarios con posterioridad a la invasión también se les denominó códices.

Otro argumento que se podría esgrimir consiste en señalar que solo se debe reservar la palabra códice a los documentos que emplean de manera exclusiva iconografía de los pueblos originarios mesoamericanos y no palabras en letras del alfabeto latino. Contra este argumento se puede apuntar que en los códices elaborados por los pueblos originarios después de la invasión castellana, se comenzó a utilizar un sistema mixto en el que se añadían a la iconografía original las palabras que en castellano o en náhuatl vertían el significado de los glifos.

La postura que afirma que el Códice Masewal no es un códice se basa en el sentido actual de la palabra, ya que el Diccionario de la Lengua Española (RAE, 2001, p. 578) da tres acepciones al término, a saber: 1) libro anterior a la invención de la imprenta; 2) libro manuscrito de cierta antigüedad; 3) parte del misal y del breviario que contiene los oficios concedidos a una diócesis o corporación particular.

Toda vez que el Códice Masewal no fue escrito con anterioridad a la invención de la imprenta ni tampoco es de cierta antigüedad, pues fue presentado al público apenas en el año 2022, se concluye que no es un códice. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que la palabra códice, asignada por los castellanos a este tipo de documentos, tampoco era exacta, pues tal y como aclaran Pardo y colaboradores (2002),

el códice era un libro manuscrito que constituía un conjunto de hojas cosidas por un lado o cara, característica que no se presentaba en los documentos mesoamericanos prehispánicos y virreinales, pues por lo general constaban en rollos, biombos, lienzos, tiras u hojas (Pardo *et al.*, 2002).

Una muy original tercera vía la encontró Elizabeth Hill Boone (2007), que en vez de nombrarlos códices prefirió llamarlos libros mexicanos (*mexican books of fate*) para referirse de forma específica a ciertos códices como el Códice Borgia. Podría esta tercera vía ser otra posibilidad para designar a estos documentos.

Se puede concluir que el Códice Masewal recoge una cosmovisión centenaria que tiene como origen a los pueblos prehispánicos. Utiliza una iconografía que la vincula con la utilización de imágenes para expresar poderosas ideas y se encuentra vinculado a un territorio bien determinado. Por estas razones, se concluye en este artículo que el Códice Masewal es un verdadero códice.

© Miguel Ángel Andrade. De la serie *Café Andrade*.





© Miguel Ángel Andrade. De la serie *Café Andrade*.

El Códice Masewal posee un contenido tan rico que merece un estudio por categorías analíticas en artículos de divulgación posteriores. En este artículo únicamente se abordaron las diferentes posturas teóricas para determinar si se trata de un verdadero códice.

Las categorías analíticas que podrían ser abordadas en trabajos posteriores son las siguientes:

1. El Códice Masewal como el primer estudio de planeación prospectiva estratégica de pueblos originarios de México.
2. El modelo de desarrollo sustentable que se construye a partir de propuestas del Códice Masewal.
3. ¿Cuáles son los alcances reales del yeknemilis como marco alternativo de desarrollo?
4. La propuesta de economía rural que se deduce del Códice Masewal.

#### R E F E R E N C I A S

Bell W (2018). *Foundations of Future Studies. Values, Objectivity and the Good Society*. Volume 2. UK: Routledge.

Boege E y Fernández L (Coords.) y Colectivos de la Unión de Cooperativas Tosepan Titataniske (UCTT) (2021). *Códice Masewal*. México: Unión de Cooperativas Tosepan Titataniske, Patrimonio Biocultural de México Red Temática Conacyt, BUAP, Rosa Luxemburg Stiftung.

Díaz G and Rodgers A (1993). *Codex Borgia. A Full-Color Restoration of the Ancient Mexican Manuscript*. USA: Dover Publications.

Hill E (2007). *Cycles of Time and Meaning in the Mexicans Books of Fate*. USA: University of Texas Press.

Justeson J (1986). The Origin of Writing Systems: Preclassic Mesoamerica. *World Archaeology* 17(3):437-458.

Marcus W (2006). La fundación de Monte Albán y los orígenes del urbanismo temprano en los Altos de Oaxaca. En Iglesias M, Valencia R y Ciudad A (Edits.) (2006). *Nuevas ciudades, nuevas patrias. Fundación y relocalización de ciudades en Mesoamérica y el Mediterráneo antiguo*. España: Sociedad Española de Estudios Mayas.

Pardo J, Peralbo J y Torres, S. (2002). Los Códices Mesoamericanos Prehispánicos. *Signo* 10:63-91.

Prem H (1971). Calendrics and Writing in Mesoamerica. En Heizer R and Graham J (Coords.). *Observations on the Emergence of Civilization in Mesoamerica*. USA: University of California.

RAE (Real Academia Española) (2021). *Diccionario de la Lengua Española*. 22 e. España: Rodesa.

Ruiz E (2010). *Mexico's Indigenous Communities. Their Lands and Histories, 1500-2010*. USA: The University Press of Colorado.

**Jorge Alberto Venegas-Díaz**  
**Doctorando en Ciencias del Desarrollo Regional y la Sustentabilidad por el Colegio de Puebla, A.C.**  
**jvd@umamexico.com.mx**

© Miguel Ángel Andrade. De la serie *Café Andrade*.





