

Directorio

Dra. Ma. Lilia Cedillo Ramírez
Rectora

Dr. Ygnacio Martínez Laguna
*Vicerrector de Investigación
y Estudios de Posgrado*

Dr. Jorge Rigoberto Juárez Posadas
Director del Instituto de Ciencias

Dra. Rosalía del Carmen Castellan Vega
Secretaria Académica ICUAP

Dra. María Guadalupe Hernández Linares
*Secretaria de Investigación y
Estudios de Posgrado ICUAP*

Dra. María del Rayo Santellán Olea
*Coordinadora de Vinculación y
Responsabilidad Social ICUAP*

Editores Responsables

Dr. Enrique González Vergara
M.C. Beatriz Espinosa Aquino

Editores adjuntos

Dra. María Eugenia Castro Sánchez
Dra. Lidia Esmeralda García Díaz
Dra. Blanca Susana Soto Cruz
Dr. Eduardo Torres Ramírez

Comité editorial

Dr. Plácido Zaca Morán,
Área de Ciencias Exactas (BUAP)
Dra. Lourdes Millán Pérez Peña,
Área de Ciencias de la Salud (BUAP)
Dr. Joaquín Alvarado Pulido,
Área de Ingeniería y Tecnología (BUAP)
Dr. José Antonio Munive Hernández,
Área de Ciencias Naturales (BUAP)
Dr. Luis Ignacio Rojas Godina,
Área de C. S. y Humanidades (BUAP)

Comité editorial extendido

Dra. María Lilia Cedillo Ramírez (BUAP)
Dra. Claudia Fabiola Martínez de la Peña (BUAP)
Dra. Margarita Ma. de la Paz Arenas Hernández (BUAP)
Dr. Miguel Ángel Méndez Rojas (UDLAP)
Dra. María del Carmen Durán Domínguez (UNAM)
Dra. Maricela Bernal González (UNAM)
M. C. Rolando Salvador García Gómez (UNAM)
Dra. Rebeca María López Rivas (UNAM)
Dr. Netzahualcóyotl Carlos Ramírez (INAOE)
Dr. Jorge Alejandro Fernández Pérez (BUAP)
Mtro. Enrique Edgardo Huitzil (FEBUAP)
D.C. Guadalupe Soto Rodríguez (FMBUAP)
Mtro. Jesús Eladio Barrientos Mora (FABUAP)

Correctoras de estilo de lengua francesa

Mtra. Leticia Estudillo León (FLBUAP)
Mtra. Rocío Barbosa Trujillo (FLBUAP)
Mtra. Sara Merino Munive (FLBUAP)
Dra. Marisol Guzmán Cova (FLBUAP)

Equipo de soporte

Dra. Mara Edna Serrano Acuña (FABUAP)
Est. Enrique Martínez Luna (FABUAP)
Est. Mariana Cabrera Meneses (FABUAP)

Equipo de diseño

Est. David Hernández Badillo
Est. Sarai Ruiz Reynoso

Jefatura de plataformas digitales y soluciones web

Ing. Genaro Rodríguez Rodríguez

Portada

Mtro. Jesús Eladio Barrientos Mora

ÍNDICE

AÑO 12 NO. 35

PRESENTACIÓN Y
CONVOCATORIA

EDITORIAL

10 - 26	OSTEOPOROSIS: LA EPIDEMIA SILENCIOSA QUE AMENAZA A LA POBLACIÓN MEXICANA
27 - 43	VALIDEZ Y FIABILIDAD: CLAVES PARA EL DESARROLLO DE UN CUESTIONARIO COMO INSTRUMENTO DE MEDICIÓN CONFIABLE
44 - 57	PLANTAS: UNA ALTERNATIVA PARA INHIBIR LA CORROSIÓN DEL ACERO AL CARBONO
58 - 73	PROTEÍNAS DREB COMO INTERRUPTORES GENÉTICOS FRENTE AL ESTRÉS AMBIENTAL EN PLANTAS
74 - 87	MCM-41: MATERIAL INNOVADOR EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y APLICACIONES DIGITALES EMERGENTES
88 - 100	EL DIÁLOGO INVISIBLE ENTRE BACTERIAS: DEL QUÓRUM SENSING A LOS BIOFILMS

101 - 110	DE MINERALES A INSTRUMENTOS QUIRÚRGICOS QUE SALVAN VIDAS
111 - 123	CEREZAS ÁCIDAS: UNA SOLUCIÓN NATURAL PARA LA GOTA
124 - 136	EL METEPANTLE: TÉCNICAS ANCESTRALES PARA PROBLEMAS AMBIENTALES
137 - 148	ENDOMETRIOSIS: POR QUÉ DUELE TANTO Y CÓMO SE ESTUDIA EN EL LABORATORIO
149 - 161	INMUNIZACIÓN CONTRA LA TUBERCULOSIS: A 100 AÑOS DE LA BCG
162 - 175	SÍNDROME DE DESGASTE PROFESIONAL (SÍNDROME DE BURNOUT) EN EL PERSONAL ACADÉMICO, ADMINISTRATIVO Y DE LA SALUD. UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA
176 - 185	MÁS ALLÁ DE LA LUPA: INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA DETECTAR A TIEMPO EL CÁNCER ORAL
186 - 195	MORFOLOGÍA, PROPAGACIÓN Y DESARROLLO VEGETATIVO DEL CAMOTE (IPOMOEA BATATAS L.) EN ATLIXCO, PUEBLA
196 - 207	PLAN MÉXICO: EL CAMINO HACIA LA SOBERANÍA EN SEMICONDUCTORES
208 - 222	REDES NEURONALES ARTIFICIALES: MODELADO, ENTRENAMIENTO Y VALIDACIÓN
223 - 236	EVOLUCIÓN E IMPORTANCIA DE LA SIMULACIÓN CLÍNICA EN LA ENSEÑANZA DE LA MEDICINA

237 - 249	SUPERCAPACITORES NANOESTRUCTURADOS: OPORTUNIDADES DE NEGOCIO EN EL MERCADO DE LA ENERGÍA
250 - 266	NANOTECNOLOGÍA: DE LA PROMESA A LA PREOCUPACIÓN

NOTAS

268 - 278	DESCIFRANDO LA FORMA DE LA VIDA: DEL MODELADO POR HOMOLOGÍA A LA REVOLUCIÓN DE ALPHAFOLD
279 - 286	UTENSILIOS DE MAQUILLAJE: ¿UN RESERVORIO INVISIBLE DE BACTERIAS?

EDITORIAL

Año 12, No. 35

Nos complace saludar nuevamente y encontrarnos con nuestros lectores, seguidores y al público en general. Con entusiasmo, les presentamos el número Año 12 No. 35 del año 2026 de nuestra revista, correspondiente al duodécimo año de publicación, reafirmando nuestro compromiso con la comunicación pública de los avances científicos e investigaciones recientes.

Reafirmamos nuestro objetivo al divulgar las investigaciones de las diversas disciplinas que se desarrollan en el Instituto de Ciencias (ICUAP) de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) como en otras instituciones universitarias hermanas.

Nuestra presencia en el índice latinoamericano de revistas LATINDEX y en el Catálogo de Revistas Europeas de Divulgación Científica HIDDEN NATURE, fortalece nuestra visibilidad a nivel internacional.

Durante el año 2026, continuaremos con la difusión de la ciencia a través de nuestro programa "RD-Divulga". En este espacio, conversaremos con investigadores invitados sobre temas de ciencia, tecnología, salud y sociedad, compartiendo conocimientos y sus aplicaciones actuales para fomentar el interés en las áreas científicas. Con la intención de ampliar nuestras actividades de divulgación y conocer la mirada de la ciencia a través del lente de la cámara, convocamos al Concurso de Fotografía Científica en la edición 2026. Seguramente nos sorprenden con su talento.

El contenido de esta edición del Año 12 No. 35 en este número, está a su disposición: 22 contribuciones, 20 son artículos, y 2 notas técnicas.

Les recordamos que mantenemos abierta la comunicación a través del correo electrónico journalrd@viep.com.mx. Donde ofrecemos la sala de soporte a los interesados en escribir divulgación científica, de lunes a viernes hábiles a través del formulario <https://forms.office.com/r/usHkMcCsuy> y seleccionar el día y la hora de atención en el horario indicado, también puedes consultar en la página de la revista, <http://rd.buap.mx/ojs-rdicuap/> en el siguiente enlace de Google Meet: <https://bit.ly/3ZJUjeN>.

Te invitamos también a consultar la página electrónica www.redica.buap.mx donde publicamos los eventos durante el año, como son el PROGRAMA RD-DIVULGA, los podcast en Spotify Compartiendo Ciencia, el Canal de YouTube JournalrdJournalrd, el Facebook CCien BuapCCien Buap, en X @IcuapRd, @IcuapRd, en BlueSky journal.bsky.socialjournal.social.

Agradecemos el esfuerzo de los alumnos de la Facultad de Arquitectura de la licenciatura en Diseño Gráfico del noveno semestre Alejandra Abigail Tejeda Flores, Victoria Ocaña Lozano, Mariana Díaz García, David Hernández Badillo, Sebastián Morelos Ayaquica y Diana Nequis Herrera en la maquetación de este número.

El talento fotográfico de Carolayn Martínez y diseño de portada del arista digital Edgar Enrique González Rosas capturaron la belleza de una libélula zurcidora de ojos azules (*Rhionaeschna multicolor*).

Invitamos a toda la comunidad universitaria a enviar sus contribuciones para nuestro próximo número. La fecha límite para la recepción de manuscritos en la 1er. convocatoria es del 20 de febrero al 20 de marzo de 2026. Les invitamos a seguirnos y participar en las actividades que hemos programado para el año en curso. A nuestras autoridades les reiteramos el apoyo y, asimismo, el entusiasmo de nuestros autores, quienes hacen posible esta publicación.

Nos leemos en el siguiente número.

Beatriz Espinosa Aquino

Enrique González Vergara

Editores responsables

RD-ICUAP

CINTILLO LEGAL AÑO 12 NO. 35

RD – ICUAP Año 12, No. 35, mayo–agosto de 2026, es una difusión periódica cuatrimestral editada por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, con domicilio en 4 sur No. 104, Col Centro, C.P. 72000, difundida a través del Instituto de Ciencias BUAP, con domicilio en el edificio IC8, Ciudad Universitaria, Col. San Manuel, Puebla, Pue., C.P. 72570, tel. 01-22-222-95500 ext. 4170, <https://rdicuap.buap.mx>, editores responsables Dr. Enrique González Vergara enrique.gonzalez@correo.buap.mx y M. C. Beatriz Espinosa Aquino beatriz.espinosa@correo.buap.mx, reserva de derechos al uso exclusivo 04-2021-092723014900-203, ISSN 2448-5829, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor de la Secretaría de Cultura. Responsables de la última actualización de este número, Instituto de Ciencias, Dr. Enrique González Vergara y M.C. Beatriz Espinosa Aquino, fecha de la última modificación, abril 2026.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Recepción: 06.03.2026

Revisión: 31.03.2026

Publicación: 08.05.2026

<https://orcid.org/0009-0001-6215-705X>

<https://orcid.org/0000-0003-1716-7707>

<https://orcid.org/0000-0002-3795-0304>

<https://orcid.org/0000-0002-5796-0649>

MAGNESIO EN EL ESPACIO CIRCUNESTELAR: UN NUEVO PANORAMA EN LA QUÍMICA CÓSMICA

MAGNESIUM IN CIRCUMSTELLAR SPACE: A NEW PANORAMA IN COSMIC CHEMISTRY

Betsie Carolina Muñoz Sanchez^{1,4},
María Eugenia Castro²,
Francisco J. Melendez^{3*}
Norberto Aquino Aquino⁴

¹Estudiante de Maestría en Ciencias Químicas, Facultad de Ciencias Químicas,

²Centro de Química, Instituto de Ciencias (ICUAP)

³Laboratorio de Química Teórica, Facultad de Ciencias Químicas,
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 72570, Puebla, México.

⁴Departamento de Física, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad
Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa, 09310, Ciudad de México, México.

Correos:

ms225470405@alm.buap.mx

mareug.castro@correo.buap.mx

naa@xanum.uam.mx

francisco.melendez@correo.buap.mx*

Resumen

La identificación de moléculas en el espacio es clave para comprender la evolución química del Universo y el origen de la materia que compone los planetas y también los sistemas vivos. Esta tarea se sustenta en la espectroscopia astronómica, una disciplina que permite detectar especies químicas a distancias interestelares mediante la interpretación de las huellas dactilares espectrales en la radiación estelar. En este artículo se presenta una revisión conceptual breve e histórica de esta técnica, desde sus fundamentos en la mecánica cuántica hasta su implementación en instrumentos interferométricos milimétricos de alta resolución. Se analiza el caso de la envoltura circunestelar de la estrella gigante roja rica en carbono IRC+10216 (CW Leonis), donde se logró la detección pionera del isocianuro y cianuro de magnesio (MgNC y MgCN). La combinación sinérgica de observaciones interferométricas y predicciones teóricas *ab initio* permitió identificar estas moléculas, desafiando el paradigma tradicional de la naturaleza química de los metales en entornos astrofísicos fríos. Este ejemplo ilustra cómo la espectroscopia astronómica, no solo cataloga la composición molecular del cosmos, sino que también revela los procesos físico-químicos que gobiernan la formación molecular en estrellas evolucionadas.

Palabras clave: Espectroscopia; Interferometría; CW Leonis; MgCN; MgNC; Astroquímica.

Abstract

The identification of molecules in space is essential for understanding the chemical evolution of the Universe and the origin of the matter that composes planets and also the living systems. This task relies on astronomical spectroscopy, a discipline that enables the detection of chemical species at interstellar distances through the interpretation of the unique spectral fingerprints imprinted on starlight. This article presents a brief conceptual and historical review of this technique, from its foundations in quantum mechanics to its implementation in high-resolution millimeter interferometric instruments. The circumstellar envelope of the carbon-rich red giant IRC+10216 (CW Leonis) is analyzed as a case study, where the pioneering detection of magnesium isocyanide and cyanide (MgNC and MgCN) was achieved. The synergistic combination of interferometric observations and *ab initio* theoretical predictions made it possible to identify these molecules, challenging the traditional paradigm regarding the chemical behavior of metals in cold astrophysical environments. This example illustrates how astronomical spectroscopy not only catalogs the molecular composition of the cosmos, but also reveals the physicochemical processes that govern molecular formation in evolved stars.

Keywords: Spectroscopy; Interferometry; CW Leonis; MgCN; MgNC; Astrochemistry.

Introducción

Espectroscopia astronómica

La espectroscopia es la rama de la física que estudia los espectros (Real Academia Española, 2023); a su vez, un espectro está definido como la distribución de la intensidad de una radiación en función de una magnitud característica, como la longitud de onda, la energía o la temperatura (Real Academia Española, 2023). Por lo que, de manera general, se puede considerar la visión humana del color o la percepción auditiva como una forma básica de espectroscopia.

Como se muestra en la Figura 1, los fundamentos de la espectroscopia moderna surgen de la teoría cuántica. Un punto clave fue el modelo atómico de Bohr, que introdujo la idea de niveles de energía cuantizados y estableció que las transiciones entre un estado inicial (E_i) y uno final (E_f) ocurren mediante la absorción o emisión de un fotón de frecuencia ν , de acuerdo con la relación $E_i - E_f = h\nu$, donde h es la constante de Planck (Merkt & Quack, 2011).



Figura 1. Experimentos espectroscópicos a lo largo de la historia que desarrollaron el marco teórico en el que se basa la espectroscopia molecular de alta resolución actual (Elaboración propia).

Además, en la imagen se observa que este marco teórico se completó posteriormente con la introducción de la teoría cuántica moderna en los trabajos de Heisenberg, Schrödinger y Dirac. En esencia, la espectroscopia molecular de alta resolución actual se basa en el uso de esta teoría mecánico-cuántica para estudiar la estructura y dinámica de átomos y moléculas, así como para numerosas aplicaciones científicas y tecnológicas.

En espectroscopia molecular, los espectros contienen información del estado cuántico de una entidad química, que se describe mediante una función de onda que define la probabilidad de obtener ciertos valores de energía. En estos

casos, la energía no se manifiesta como un único valor, sino como una distribución estadística asociada a dichas probabilidades. En analogía se puede decir que se maneja como un acorde musical, el cual no es una sola nota, sino la mezcla de varias notas que, al ser analizadas, revelan las notas individuales y su intensidad.

Como consecuencia, los espectros observados consisten en patrones de líneas cuya posición e intensidad reflejan las probabilidades de transición entre niveles de energía específicos. Como consecuencia, los espectros observados consisten en patrones de líneas cuya posición e intensidad reflejan las probabilidades de transición entre niveles de energía específicos.

Huellas dactilares de las moléculas

Los espectros, con sus patrones característicos, permiten identificar átomos y moléculas particulares, tanto en el laboratorio como en el espacio, actuando como verdaderas **huellas dactilares espectrales**.

Estas huellas dactilares espectrales se revelan a través de un proceso de medición espectroscópica. En dicha medición en un laboratorio es necesario aplicar un estímulo que se hace llegar a la muestra para medir posteriormente su respuesta, la cual es registrada por un dispositivo de detección. En muchos experimentos espectroscópicos, la muestra consiste en moléculas en equilibrio térmico, y la perturbación externa induce transiciones entre sus niveles de energía, generando una desviación controlada de dicho equilibrio. En general, cuando se buscan observar las propiedades fundamentales de un

sistema, es conveniente perturbarlo lo menos posible durante la medición, de modo que se resalten sus propiedades intrínsecas sin alterar significativamente su comportamiento natural. Sin embargo, en astronomía no se controla el estímulo, sino que únicamente se observa la radiación emitida o absorbida de manera natural por los objetos celestes.

Es por ello que al analizar la luz que llega de una estrella, una de las primeras características observables es su color. A través de la ley de Wien, el color del máximo de emisión permite estimar la temperatura superficial de la estrella. Como se muestra en la Figura 2, las estrellas se clasifican según su temperatura, observándose que aquellas más calientes emiten principalmente en la región azul del espectro, mientras que las más frías lo hacen en la región roja (Costa et al., 2012).

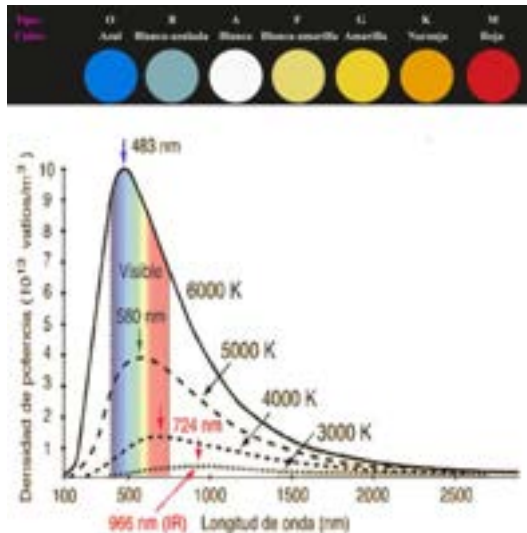


Figura 2: Tipos espectrales de estrellas determinados por la ley de Wien (Elaboración propia).

Por otro lado, la luminosidad de una estrella no depende únicamente de su temperatura, sino también de su tamaño. Por ello, existen estrellas frías muy luminosas, como las gigan-

tes y supergigantes rojas, y estrellas calientes poco luminosas, como las enanas blancas. Esta información es clave para comprender la etapa evolutiva de la estrella.

En la Figura 3 se puede observar que la evolución estelar depende fuertemente de la masa inicial de la estrella. Las estrellas menos masivas, generalmente más frías y de menor luminosidad, evolucionan de manera distinta a las estrellas más masivas, que son más calientes y brillantes.

Durante gran parte de su vida, las estrellas permanecen en equilibrio hidrostático, donde la atracción gravitatoria tiende al colapso, y la presión interna, asociada a la producción de energía en el núcleo, actúa para compensarlo.

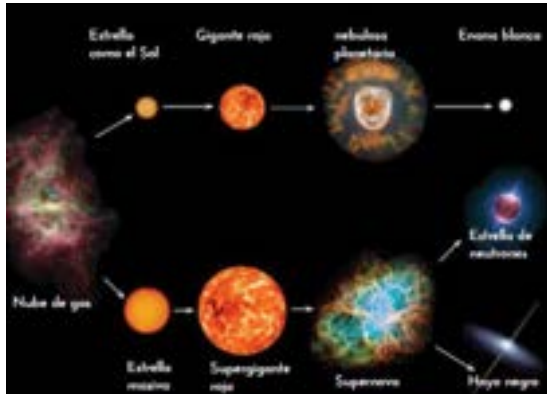


Figura 3: Evolución de las estrellas según su masa (Costa et al., 2012).

Cuando el combustible nuclear comienza a agotarse, este equilibrio se rompe, y la estrella entra en una fase de gigante roja. Estas etapas evolutivas generan entornos ricos en moléculas, como las envolturas circunestelares, las cuales pueden ser estudiadas espectroscópicamente con la instrumentación adecuada desde la Tierra. Con el tiempo, las estrellas expulsan sus capas externas y los cuerpos estelares de baja y mediana masa, como el Sol, terminan su evolución como enanas blancas. Por otro lado, las estrellas muy masivas evolucionan hacia supergigantes rojas y pueden finalizar su vida en una explosión de supernova, dando lugar a una estrella de neutrones o, en los casos más extremos, a un agujero negro.

En el Universo, hay material que está a temperaturas mucho más bajas que la de las estrellas, como las nubes de material interestelar. Estas nubes no emiten radiación visible, pero pueden ser detectadas en longitudes de onda largas, como el infrarrojo, las microondas y las ondas de radio. Observar el Universo en distintas regiones del espectro electromagnético permite obtener una imagen más completa de su

estructura, temperatura y contenido energético, y construir modelos mucho más realistas de su evolución (García et al., 2012).

La mayoría de los cuerpos celestes emiten radiación en múltiples longitudes de onda. Algunas regiones del espectro electromagnético pueden quedar bloqueadas por la presencia de polvo o gas. Por ejemplo, el polvo presente en el centro de nuestra galaxia impide ver la intensa luz visible producida por la concentración de millones de estrellas. Sin embargo, dicho polvo es transparente a la radiación infrarroja, que logra atravesarlo y llegar hasta los instrumentos de observación en la Tierra. Este polvo protege a las especies moleculares de ser destruidas por la radiación ionizante y podría ser de ayuda en la formación de moléculas complejas.

Un claro ejemplo de estas detecciones son el descubrimiento de las huellas dactilares moleculares del agua (H₂O), el metano (CH₄) y moléculas orgánicas complejas en nubes interestelares y atmósferas planetarias, simplemente analizando los patrones de líneas en sus espectros de radio y microondas.

Estrella CW Leonis

La estrella IRC+10216 (también conocida como CW Leonis) es una estrella del tipo gigante roja, rica en carbono (NASA, 2023), la cual se encuentra en las últimas etapas de su evolución estelar, Figura 4. Su importancia para la astronomía radica en su proximidad al Sol y el gran tamaño angular de su envoltura, características que permiten estudios detallados del proceso de pérdida de masa, así como de las últimas etapas de la evolución estelar y de la evolución de la composición del medio interestelar en estas etapas (Knapp, 2002).

Debido a la baja temperatura de CW Leonis se espera que tenga una envoltura circunestelar primordialmente molecular, cuyas abundancias estén determinadas por la química de la fotosfera (capa superficial visible de la estrella) y otros procesos químicos importantes que

tienen lugar a medida que el gas fluye fuera de la estrella, tales como:

- Formación de polvo en unos pocos radios estelares, incorporando una gran fracción de los elementos refractarios, los cuales son elementos químicos con altas temperaturas de condensación que, al enfriarse el gas, se solidifican y forman parte de granos de polvo mineral, como silicatos y óxidos.
- La fotodisociación de muchas moléculas por la radiación UV cuando cruzan el espacio interestelar.
- Formación de moléculas de cadenas complejas mediante reacciones ion-molécula en la envoltura exterior.



Figura 4. CW Leonis, también conocida como IRC+10216, una gigante roja rica en carbono con una compleja envoltura circunestelar (NASA, 2023).

Se puede decir que CW Leonis, y en particular su envoltura circunestelar, la cual es la más brillante y rica en moléculas de todo el cielo, ha sido objeto de intensos estudios, incluyendo diversos estudios de líneas espectrales en longitudes de onda milimétricas y submilimétricas, que revelan el espectro rotacional detallado de las líneas moleculares del objeto.

Hasta 1930 la existencia de moléculas en el medio interestelar era desconocida, se sabía de la existencia de algunos metales como Ca, K, Na, Fe y Ti sólo a nivel atómico. Fue a mediados de esta década cuando aparecieron evidencias de la existencia de algunas moléculas interestelares como CH, CH⁺ y CN (Penzias y Encrenaz 1983).

Hasta la fecha, se han detectado alrededor de 60 especies moleculares y atómicas en la envoltura de la gigante roja CW Leonis (Knapp, 2002), un verdadero zoológico químico interestelar. Entre todos sus habitantes, dos moléculas destacan por su singularidad: el cianuro de

magnesio (MgCN) y el isocianuro de magnesio (MgNC), debido a que su detección constituyó la primera observación en todo el cosmos de moléculas portadoras de magnesio, confirmando a esta estrella como un laboratorio único para la química del Universo.

Detección teórica y experimental de MgNC

La detección del isocianuro de magnesio, MgNC , en el espacio, resumida en la Figura 5, fue posible gracias a la concordancia de predicciones teóricas y experimentos de laboratorio. El proceso se inició en 1986, cuando a

través de las mediciones realizadas en la región milimétrica del espectro con el Interferómetro de Plateau de Bure, se detectaron líneas espectrales de microondas no identificadas en la envoltura circunestelar de la estrella CW Leonis.



Figura 5: Esfuerzos realizados para que en conjunto se lograra identificar la presencia de MgNC en la envoltura circunestelar de CW Leonis (Elaboración propia).

Dicho interferómetro, como se muestra en la Figura 6, consta de tres antenas móviles de 15 m de diámetro dispuestas a lo largo de una vía férrea en forma de T (Guilloteau et al., 1992). En una medición espectroscópica el interferómetro utiliza las tres antenas para observar el mismo objeto al mismo tiempo de modo que, al combinar la señal recibida por cada antena, simula un telescopio de mayor tamaño y, por lo tanto, obtiene una mejor resolución angular, extrayendo información más precisa del objeto observado con respecto al fondo del universo. Tras la observación inicial de líneas espectrales

misteriosas en la gigante roja CW Leonis, se realizaron diversos cálculos a nivel *ab initio*, de los cuales destacan los realizados por Ishii y colaboradores en 1993, que proporcionaron las ‘huellas dactilares’ teóricas del MgNC . De forma independiente y casi simultánea, el espectro rotacional de esta molécula fue medido por primera vez en el laboratorio. La coincidencia exacta de las mediciones teóricas y experimentales con las líneas espectrales misteriosas identificadas previamente, confirmó la presencia de MgNC en la gigante roja CW Leonis (Ishii et al., 1993).



Figura 6. Las tres antenas del Interferómetro Plateau de Bure están totalmente orientables y móviles a lo largo de las vías del tren (Guilloteau et al., 1992).

Esta identificación fue notable por varios aspectos (Guélin et al., 1993):

1. Desafió las expectativas de que el magnesio, abundante pero usualmente en forma iónica (Mg^+) e inerte en entornos fríos, no formará moléculas.
2. MgNC se convirtió así en la primera molécula portadora de magnesio jamás observada en el espacio.
3. La forma característica de 'U' de sus líneas espectrales reveló que esta molécula refractaria es particularmente abundante en las regiones más frías y externas de la envoltura circunestelar.

Detección del Isómero MgCN : Un Logro de Predicción Teórica

La identificación del isocianuro de magnesio, MgNC , en 1993 abrió la puerta para buscar su isómero. Los cálculos teóricos, como los de Ishii y colaboradores que habían predicho las propiedades del MgNC , indican la existencia de un isómero estructural casi igualmente estable: el cianuro de magnesio, MgCN , sugiriendo que también podría estar presente en la envoltura de la estrella CW Leonis (Ishii et al., 1994).

A diferencia de MgNC , cuya huella dactilar se pudo medir en el laboratorio, la detección de MgCN dependió decisivamente de las predicciones teóricas de alta precisión en el cálculo de sus frecuencias rotacionales. En 1995, el equipo de Ziurys y colaboradores logró identificar las líneas espectrales del MgCN en el espectro de la envoltura de CW Leonis. Esta identificación fue posible al encontrar en los datos astronómicos un patrón de líneas que coincidía de forma única con las frecuencias rotacionales predichas por los cálculos a nivel *ab initio* para el MgCN (Ziurys et al., 1995). Su hallazgo confirmó la presencia del isómero en el espacio y validó el poder predictivo de la química teórica computacional. Este caso subraya un gran aspecto fascinante de la astroquímica moderna: el gran poder de detección de un gran número de moléculas "solamente usando técnicas basadas en la química teórica" en el espacio.

Estudios posteriores han usado la relación de abundancia observada entre MgNC y MgCN (que favorece al primero, el más estable teóricamente) y los mecanismos de formación propuestos para entender mejor las condiciones físicas y químicas de la envoltura circunestelar. Así, la búsqueda exacta de estas "huellas dactilares" no sólo expandió el inventario molecular cósmico, sino que también validó los modelos teóricos que explican su existencia.

MgCN y MgNC: Claves para Descifrar la Química Cósmica de los Metales

El descubrimiento de MgNC y MgCN en la envoltura circunestelar de la estrella CW Leonis hizo mucho más que ampliar el inventario molecular interestelar: reveló una profunda revisión de la química de los metales en el espacio y abrió una línea de investigación para elucidar cómo pueden y deben formarse moléculas que contienen magnesio, un elemento tradicionalmente considerado refractario e inerte, en las frías regiones del medio circunestelar.

Durante décadas, se asumió que metales como el magnesio se condensan casi por completo en granos de polvo, descartando su participación en la química de fase gaseosa. Sin embargo, la evidencia observacional en CW Leonis demostró que esto no era del todo cierto. La localización espacial de MgNC, predominantemente en las regiones externas y frías de la envoltura en expansión, apunta a un régimen químico dominado no solamente por el equilibrio termodinámico, sino por procesos cinéticos, fotoquímicos y reacciones ion-molécula.

En este entorno tan hostil para el ser humano, especies altamente reactivas pueden formarse y sobrevivir. Experimentos de laboratorio pioneros ya habían mostrado que iones metálicos podían participar eficientemente en procesos de asociación radiativa a bajas temperaturas. En el caso de la gigante roja CW Leonis, los iones Mg^+ , lejos de ser químicamente inertes, probablemente interactúan con radicales abundantes como CN, iniciando rutas de reacción que conducen a la formación de MgNC y MgCN (Petrie, 1996).

De esta manera, la detección de estas moléculas nos abre el panorama a pensar que:

- Una fracción significativa de los metales permanece activa en la fase gaseosa.
- Los metales pueden participar en una química molecular rica bajo condiciones astrofísicas adecuadas.
- La formación molecular en envolturas circunestelares es sin duda un proceso altamente estratificado, donde distintas regiones albergan mecanismos sintéticos diferentes.

Cabe destacar que esta línea de investigación ha continuado con estudios teóricos y experimentales de laboratorio realizados de manera conjunta, que han caracterizado no solo el estado electrónico fundamental de estas moléculas, sino también sus diversos estados electrónicos vibracionalmente excitados (Kagi et al., 1995). Estos trabajos proporcionan información crucial sobre su estabilidad y reactividad química, ayudando a resolver los enigmas sobre el papel específico de estas moléculas en las últimas etapas de la evolución de la estrella CW Leonis.

Así, el camino que comenzó con la observación de líneas espectrales desconocidas culmina en una comprensión más profunda de la química cósmica. Las “huellas dactilares” espectrales de los isómeros MgNC y MgCN no solo identifican nuevas especies moleculares, sino que revelan un universo dinámico, en el que incluso los elementos más refractarios encuentran vías para incorporarse a la compleja danza de la formación molecular. La espectroscopia astronómica, una vez más, no solo nos dice qué existe en el cosmos, sino que nos obliga a replantear cómo funciona su química más íntima.

Conflicto de intereses

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún conflicto de interés.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del escrito, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Descargo de Responsabilidad (Inteligencia Artificial) Los autores declaran por la presente que NO se han utilizado tecnologías de IA generativa, tales como modelos de lenguaje grandes (ChatGPT, COPILOT, etc.) y generadores de texto a imagen, durante la redacción o edición de este manuscrito.

Agradecimientos

Betsie Carolina Muñoz Sánchez agradece a la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECITHI) por la beca de maestría con número 913479. Los autores agradecen a la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado (VIEP) de la BUAP, al Cuerpo Académico BUAP-CA-263 (SEP, PRODEP), al Laboratorio Nacional de Supercómputo del Sureste de México (LNS-BUAP) y al Laboratorio de Supercómputo y Visualización en Paralelo de la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa (UAM-I, México) por los recursos computacionales otorgados.

Referencias

- Costa, A., García, B., Moreno, R., & Ros, R. M. (2012). Vida de las estrellas. En R. M. Ros & B. García (Eds.), 14 pasos hacia el Universo: Curso de Astronomía para profesores y posgraduados de ciencias (pp. 104-113). Red para la educación astronómica en la escuela NASE, Unión Astronómica Internacional (UAI).
- García, B., Moreno, R., & Ros, R. M. (2012). Astronomía fuera de lo visible. En R. M. Ros & B. García (Eds.), 14 pasos hacia el Universo: Curso de Astronomía para profesores y posgraduados de ciencias (pp. 114-125). Red para la educación astronómica en la escuela NASE, Unión Astronómica Internacional (UAI).
- Guélin, M., Lucas, R., & Cernicharo, J. (1993). MgNC and the carbon-chain radicals in IRC+10216. *Astronomy and Astrophysics*, 280, L19-L22.
- Guilloteau, S., Delannoy, J., Downes, D., Greve, A., Guélin, M., Lucas, R., Morris, D., Radford, S. J. E., Wink, J., Cernicharo, J., Forveille, T., García-Burillo, S., Neri, R., Blondel, J., Perrigouard, A., Plathner, D., & Torres, M. (1992). The IRAM interferometer on Plateau de Bure. *Astronomy and Astrophysics*, 262, 624-633.
- Ishii, K., Hirano, T., Nagashima, U., Weis, B., & Yamashita, K. (1993). An ab initio prediction of the spectroscopic constants of MgNC: The first Mg-bearing molecule in space. *The Astrophysical Journal*, 410(2), L43-L44.
- Ishii, K., Hirano, T., Nagashima, U., Weis, B., & Yamashita, K. (1994). Ab initio study on low-lying vibrational states and spectroscopic constants of MgNC ($X^2\Sigma$). *Journal of Molecular Structure: THEOCHEM*, 305, 117-125.
- Kagi, E., Kawaguchi, K., Takano, S., & Hirano, T. (1995). Rotational spectra in the Σ vibrationally excited states of MgNC. *The Journal of Chemical Physics*, 104(4), 1263-1267.
- Knapp, G. R. (2002). CW Leonis, IRC+10216. En C. A. Tout & W. Van Hamme (Eds.), *International Astronomical Union Colloquium* (Vol. 187, pp. 259-271). Cambridge University Press.
- Merkt, F., & Quack, M. (2011). *Molecular Quantum Mechanics and Molecular Spectra, Molecular Symmetry, and Interaction of Matter with Radiation*. En M. Quack & F. Merkt (Eds.), *Handbook of High-resolution Spectroscopy. Fundamentals and Theory* (Vol. 1, pp. 1-55). Wiley.
- National Aeronautics and Space Administration [NASA]. (2023, julio 26). CW Leonis [Imagen]. NASA Science. Recuperado 8 de enero de 2025, de <https://science.nasa.gov/image-detail/cw-leonis/>
- Penzias, A. y Encrenaz P. (1983). Las moléculas del espacio, Capítulo 12 en *ASTROFÍSICA*, Recopilación de artículos de LA RECHERCHE, Ediciones Orbis, Barcelona, España.
- Petrie, S. (1996). On the formation of metal cyanides and related compounds in the circumstellar envelope of IRC +10216. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 282(3), 807-819.
- Real Academia Española. (2023). Espectro. En *Diccionario de la lengua española* (24.ª ed.). Recuperado 7 de enero de 2025, de <https://dle.rae.es/espectro>
- Real Academia Española. (2023). Espectroscopia. En *Diccionario de la lengua española* (24.ª ed.). Recuperado 7 de enero de 2025, de <https://dle.rae.es/espectroscopia>
- Ziurys, L. M., Apponi, A. J., Guélin, M., & Cernicharo, J. (1995). Detection of MgCN in IRC +10216: A new metal-bearing free radical. *The Astrophysical Journal*, 445(1), L47-L50.

Recepción: 10.11.2025

Revisión: 10.12.2025

Publicación: 08.05.2026

<https://orcid.org/0009-0000-5922-4381>

<https://orcid.org/0000-0002-5101-7705>

<https://orcid.org/0009-0003-4635-7494>

<https://orcid.org/0009-0000-0279-6434>

<https://orcid.org/0000-0002-6967-7939>

OSTEOPOROSIS: LA EPIDEMIA SILENCIOSA QUE AMENAZA A LA POBLACIÓN MEXICANA

OSTEOPOROSIS: THE SILENT EPIDEMIC THREATENING MEXICO'S POPULATION

Ramírez Romero Francisco de Jesús¹,
Mendoza Pinto Claudia²,
Fajardo Rodríguez Alejandra¹,
Barreto Victoria Maryjose¹,
Munguía Realpozo Pamela^{1*}

¹. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Posgrado en Ciencias Médicas e Investigación, Puebla, México. Calle 13 Sur 2702, Los Volcanes, C.P 72420, Heroica Puebla de Zaragoza, Pue.

². Instituto Mexicano del Seguro Social, Centro de Investigación Biomédica de Oriente, Puebla, México. Hospital General de Zona No. 5 Km 4.5 Carretera Federal Atlixco-Metepec 74360 Metepec, Puebla, México.

Correos
franciscod.ramirezr@gmail.com
cmendozap.26@gmail.com
pamela.munguia@yahoo.com.mx
pamela.munguiareal@correo.buap.mx
pamela.munguiarealpozo@viep.com.mx

Resumen

La osteoporosis es una enfermedad que afecta a millones de personas a nivel mundial, cuya consecuencia más grave es la fractura. Su prevalencia es alta, afectando principalmente a mujeres y adultos mayores: en México se estima que una de cada tres mujeres mayores de cincuenta años se encuentra en riesgo de presentar fracturas asociadas a osteoporosis. Estas lesiones tienen un fuerte impacto en la movilidad, la independencia y la calidad de vida de quienes las padecen. Aunque la información disponible sobre mortalidad en la población mexicana aún es limitada, el envejecimiento poblacional anticipa un incremento considerable de casos en los próximos años, por lo que es importante recalcar que la osteoporosis es una enfermedad prevenible y tratable. Algunas intervenciones, como el ejercicio multicomponente que combina flexibilidad, equilibrio y fuerza, especialmente cuando incluye actividades de carga, favorecen la salud ósea. Asimismo, la suplementación con calcio y vitamina D ha demostrado eficacia en reducir la incidencia de fracturas en adultos mayores, mientras que la suplementación con vitamina K ofrece beneficios adicionales en mujeres posmenopáusicas. Dentro de las opciones farmacológicas, además de los tratamientos convencionales, se cuenta con tratamientos innovadores, como los anabólicos óseos y los anticuerpos monoclonales, que destacan por su mayor capacidad para prevenir fracturas. La osteoporosis no debe considerarse un destino inevitable del envejecimiento. Mediante estrategias de prevención, diagnóstico oportuno e investigación continua, es posible reducir su impacto en la población mexicana.

Palabras clave: Osteoporosis; fracturas osteoporóticas; salud pública.

Abstract

Osteoporosis is a disease that affects millions of people worldwide, with fractures representing its most serious consequence. Its prevalence is high, primarily impacting women and older adults. In Mexico, it is estimated that one in three women over the age of fifty is at risk of experiencing fractures associated with osteoporosis. These injuries have a profound effect on mobility, independence, and overall quality of life. Although available data on mortality among the Mexican population remain limited, population aging foresees a significant increase in cases in the coming years. Research demonstrates that osteoporosis is both preventable and treatable. Multicomponent exercise programs that combine flexibility, balance, and strength—especially those involving weight-bearing activities—contribute to bone health. Likewise, calcium and vitamin D supplementation has proven effective in reducing the incidence of fractures in older adults, while vitamin K supplementation provides additional benefits for postmenopausal women. Among pharmacological options, innovative treatments such as bone-forming agents and monoclonal antibodies stand out for their greater ability to prevent fractures. Osteoporosis should not be considered an inevitable outcome of aging. Through prevention strategies, timely diagnosis, and continuous research, it is possible to reduce its impact on the Mexican population.

Keywords: Osteoporosis; osteoporotic fractures; public health.

Introducción

La osteoporosis es una enfermedad del esqueleto caracterizada por una disminución progresiva de la densidad y la calidad del hueso, lo que provoca que se vuelva más frágil y susceptible a sufrir fracturas incluso con traumas leves. Esta pérdida de masa ósea ocurre de manera silenciosa y se asocia principalmente con el envejecimiento, la menopausia y ciertos factores clínicos y nutricionales que alteran el equilibrio entre la formación y la resorción del hueso (Ma et al., 2022; Salari, Darvishi, et al., 2021; Weaver et al., 2016).

Es reconocida en la literatura médica como una enfermedad imperceptible y, al mismo tiempo, una de las más devastadoras del envejecimiento. Se le ha denominado la "epidemia silenciosa" porque avanza sin síntomas durante años: los huesos se van debilitando de manera progresiva y el paciente no lo percibe hasta que resulta inminente la primera fractura (Salari, Ghasemi, et al., 2021). En ese momento la enfermedad deja de ser invisible y se manifiesta con toda su magnitud, alterando de manera irreversible la vida de las personas.

Las fracturas osteoporóticas tienen un impacto que va mucho más allá del dolor físico. En numerosos casos se convierten en un punto de inflexión: una persona independiente puede perder su capacidad de caminar sin ayuda, necesitar asistencia constante para actividades cotidianas o incluso enfrentar una reducción significativa en su esperanza de vida. Este escenario es especialmente alarmante si se considera que el aumento de la población adulta mayor incrementará de manera inevitable la carga de osteoporosis en las próximas décadas (Salari, Darvishi, et al., 2021).

El problema es global y afecta tanto a hombres como a mujeres. Sin embargo, son las mujeres posmenopáusicas quienes presentan mayor vulnerabilidad, debido a los cambios hormonales que aceleran la pérdida de masa ósea. Se calcula que una de cada tres mujeres mayores de 50 años sufrirá al menos una complicación relacionada con la osteoporosis a lo largo de su vida, y entre los hombres la cifra es de uno de

cada cinco (Salari, Darvishi, et al., 2021). Estas proporciones reflejan una enfermedad que ya no puede ser vista como un padecimiento individual, sino como un verdadero desafío de salud pública (Salari, Ghasemi, et al., 2021).

En este contexto, es importante destacar que la osteoporosis no solo se limita al ámbito clínico. Sus consecuencias repercuten en múltiples niveles: en la calidad de vida del paciente, en la economía familiar y en los recursos de los sistemas de salud. Las consecuencias de la osteoporosis pueden significar meses de rehabilitación, pérdida de la autonomía personal y costos elevados para las familias, que muchas veces deben asumir cuidados permanentes. Para los sistemas sanitarios, implica hospitalizaciones prolongadas, intervenciones quirúrgicas costosas y una mayor presión sobre los servicios de rehabilitación y cuidados a largo plazo (Salari, Darvishi, et al., 2021).

A pesar de la severidad del problema, existe un hecho esperanzador: la osteoporosis no es inevitable. Durante mucho tiempo se asumió que la pérdida de masa ósea era una consecuencia natural del envejecimiento, imposible de modificar. Sin embargo, la evidencia científica más reciente demuestra que es posible prevenir la enfermedad y reducir sus complicaciones con intervenciones oportunas (Kemmler et al., 2020; Linhares et al., 2022; Weaver et al., 2016).

Hábitos de vida saludables, programas de ejercicio, una nutrición adecuada y tratamientos farmacológicos eficaces han transformado el panorama de la osteoporosis, abriendo la puerta a estrategias de prevención y manejo que antes no existían (Händel et al., 2023; Ma et al., 2022; Singh et al., 2022).

En México, la situación adquiere un matiz particular. Nuestro país atraviesa un proceso de envejecimiento acelerado, con un crecimiento sostenido de la población mayor de 50 años. Este fenómeno, aunque es un logro demográfico, también representa un reto sanitario: a mayor número de adultos mayores, mayor será la incidencia de

fracturas osteoporóticas y, en consecuencia, mayor la carga sobre el sistema de salud y las familias. Sin embargo, la osteoporosis aún no recibe la atención prioritaria que merece dentro de las políticas públicas, lo que retrasa la posibilidad de implementar medidas de detección temprana y prevención.

Frente a este panorama, la divulgación científica juega un papel esencial. Explicar de manera accesible qué es la osteoporosis, cuáles son sus consecuencias y cómo puede prevenirse es fundamental para sensibilizar tanto a la población general como a los profesionales de la salud. Solo reconociendo la magnitud del problema podremos avanzar hacia estrategias más eficaces que eviten que miles de personas sufran las consecuencias de una enfermedad prevenible.

La magnitud del problema

La osteoporosis representa un desafío global cuya magnitud ha sido documentada en diferentes regiones del mundo. Un metaanálisis reciente estimó que la prevalencia mundial alcanza el 18.3% de la población general, con un 23.1% en mujeres y un 11.7% en hombres (Salari, Ghasemi, et al., 2021). Cuando se analizan específicamente los adultos mayores, la prevalencia asciende al 21.7%, con cifras que superan el 35% en mujeres frente a un 12.5% en hombres (Salari, Darvishi, et al., 2021). Estas cifras demuestran que la enfermedad afecta a ambos sexos, aunque de manera mucho más marcada a las mujeres postmenopáusicas.

Las diferencias regionales son también notables. África presenta la prevalencia más alta, con un 39.5%, seguida por Asia, donde en adultos mayores se ha reportado una prevalencia del 24.3% (Salari, Darvishi, et al., 2021; Salari, Ghasemi, et al., 2021). Europa presenta valores intermedios, alrededor del 16.7%, mientras que América reporta los porcentajes más bajos, con una media del 11.5% (Salari, Darvishi, et al., 2021). Estas variaciones reflejan no solo diferencias genéticas y ambientales, sino también factores sociales como el acceso a diagnóstico, la calidad de la nutrición, los estilos de vida y la cobertura de programas de salud pública. La osteoporosis no es un problema exclusivo

de Europa o Estados Unidos; también en América Latina tiene un peso considerable. Uno de los estudios más importantes en la región, el Latin American Vertebral Osteoporosis Study (LAVOS), evaluó a casi dos mil mujeres mayores de 50 años en países como Argentina, Brasil, Colombia, México y Puerto Rico (Clark et al., 2009).

Los resultados mostraron que la prevalencia de fracturas vertebrales fue del 11% en promedio, y que esta cifra aumentaba con la edad, alcanzando casi un 28% en mujeres mayores de 80 años (Clark et al., 2009). Estos hallazgos son relevantes porque demuestran que la frecuencia de fracturas vertebrales en Latinoamérica es similar a la observada en Europa y China, y solo ligeramente menor que en Estados Unidos (Clark et al., 2009).

En el caso de México, los datos de LAVOS revelaron una de las prevalencias más altas de la región, lo que confirma que la osteoporosis también es un problema prioritario para nuestro país (Clark et al., 2009). La importancia de este estudio radica en que ofrece una visión regional con metodología estandarizada, lo que permite comparaciones internacionales más confiables.

El análisis por grupos de edad muestra cómo la prevalencia aumenta conforme avanza el envejecimiento. A partir de los 50 años se observa un crecimiento sostenido en el riesgo de complicaciones, que alcanza su punto máximo en la población de 75 años o más (Salari, Darvishi, et al., 2021). Lo que coincide con el perfil de fragilidad propio del envejecimiento y la acumulación de enfermedades crónicas que agravan la vulnerabilidad ósea.

Más allá de la prevalencia, lo verdaderamente relevante son las consecuencias de esta enfermedad. Se estima que una de cada tres mujeres y uno de cada cinco hombres mayores de 50 años sufrirán al menos una fractura osteoporótica en el transcurso de su vida (Salari, Darvishi, et al., 2021). Entre ellas, las fracturas de cadera tienen un especial significado, ya que no solo generan incapacidad prolongada, sino que además se asocian con un incremento de hasta un 20% en la mortalidad durante el primer año posterior al evento (Salari, Darvishi, et al., 2021).

El impacto de la osteoporosis en México ya es visible en las cifras de fracturas. Para el año 2005 se estimaron 29,732 fracturas de cadera, y desde entonces la tendencia ha sido creciente. Entre 2006 y 2019, la proporción de fracturas de antebrazo pasó del 44% al 53%, mientras que las fracturas de húmero proximal afectaron al 43% de las mujeres y al 34% de los hombres. En 2019 se observó un incremento notable en las fracturas de cadera, con un aumento del 42% en mujeres y del 40% en hombres (Barros-Sevillano et al., 2023; Clark et al., 2024; Clark & Tamayo, 2013; Rosales-Aujang E et al., 2014).

En México, las enfermedades musculoesqueléticas —entre las que se incluyen la osteoporosis y las fracturas asociadas— representan una proporción importante de los años vividos con discapacidad (YLD) de acuerdo con estimaciones internacionales del Global Burden of Disease (GBD) el cual es un proyecto internacional de investigación en salud pública coordinado por el Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME). Su objetivo es medir y comparar el impacto de enfermedades, lesiones y factores de riesgo en distintos países y regiones del mundo.

El GBD utiliza indicadores como los Años de Vida Perdidos (YLL) y los Años Vividos con Discapacidad (YLD) para calcular la carga global de enfermedad y ofrecer una visión integral del estado de salud de las poblaciones. Este grupo de padecimientos constituye una de las principales causas de limitación funcional en la población adulta mayor, lo que refleja el impacto creciente del envejecimiento demográfico en la salud pública nacional. Aunque las cifras específicas pueden variar según la metodología y el año de estudio, la evidencia coincide en señalar que las enfermedades del sistema musculoesquelético generan una carga significativa de discapacidad y demandan estrategias efectivas de prevención, diagnóstico y tratamiento oportuno, demandas que incrementarán conforme la población mayor se duplique en las próximas décadas.

La edad promedio al momento de una fractura se sitúa en 76 años, lo que refleja la vulnerabilidad de la población mayor. Las proyecciones son aún

más preocupantes: para el año 2050 se espera que las fracturas por osteoporosis alcancen las 155,874 anuales, impulsadas por el crecimiento de la población mayor de 50 años que podría aumentar hasta en un 200% (Barros-Sevillano et al., 2023; Clark et al., 2024; Clark & Tamayo, 2013; Rosales-Aujang E et al., 2014) y que el número de personas afectadas por la osteoporosis sea mayor en países de ingresos medios y bajos, entre ellos México y gran parte de América Latina. Este panorama se traduce en un impacto doble: más personas afectadas y un sistema de salud que deberá responder a una demanda creciente de atención especializada, rehabilitación y cuidados prolongados.

Estas cifras ponen en evidencia que la osteoporosis no puede considerarse un problema exclusivo del ámbito clínico, sino un desafío de salud pública mundial. La elevada prevalencia, el predominio en mujeres y adultos mayores, la gran variabilidad regional y la clara tendencia al alza con el envejecimiento poblacional conforman un escenario que exige respuestas inmediatas. No se trata únicamente de tratar con complicaciones una vez que ocurren, sino de prevenir su aparición mediante políticas integrales que incluyan educación, programas de detección temprana, fomento de la actividad física y acceso equitativo a tratamientos efectivos.

En suma, el impacto de la osteoporosis radica no solo en cuántas personas la padecen, sino en la velocidad con la que la enfermedad se está expandiendo y en las profundas consecuencias que genera. Reconocer este problema en toda su dimensión es el primer paso para desarrollar estrategias de salud pública capaces de reducir la carga de fracturas, la discapacidad y la mortalidad asociada en las próximas décadas.

Impacto clínico y social

Las fracturas derivadas de la osteoporosis no son eventos aislados ni triviales: representan una de las complicaciones más graves del envejecimiento y tienen un efecto directo en la expectativa y calidad de vida. Entre todas, las que afectan la cadera se consideran las más críticas, no solo porque requieren tratamiento quirúrgico y largos periodos de reha-

bilitación, sino porque se asocian con una elevada mortalidad. Diversos estudios han documentado que hasta un 20% de las personas que sufren una fractura de cadera fallecen durante el primer año posterior al evento (Salari, Darvishi, et al., 2021).

El impacto funcional es igualmente alarmante, ya que únicamente alrededor de un tercio de los pacientes logra recuperar su nivel previo de independencia (Salari, Darvishi, et al., 2021). El resto enfrenta limitaciones que lo obligan a depender de otras personas para actividades tan básicas como caminar, vestirse o realizar tareas domésticas. Esto significa que una lesión que ocurre en cuestión de segundos puede transformar de manera definitiva la vida de un individuo y la dinámica de su familia.

El costo emocional y social de estas fracturas también es considerable. Muchas personas mayores, tras un episodio de este tipo, experimentan miedo a volver a caerse, lo que provoca una reducción en sus actividades cotidianas, aislamiento social y deterioro progresivo de su estado de ánimo. Esta pérdida de confianza en la movilidad genera un círculo vicioso: cuanto menos se mueve la persona, mayor es la pérdida de masa muscular y densidad ósea, lo que incrementa nuevamente el riesgo de caídas y fracturas.

La osteoporosis genera una carga económica y social considerable que trasciende el ámbito médico. Al debilitar progresivamente la estructura ósea, la enfermedad aumenta la vulnerabilidad de millones de personas, sobre todo en edades avanzadas, y se traduce en mayores necesidades de atención sanitaria, que incluyen cirugías, rehabilitación y cuidados de largo plazo.

A esto se suman los gastos indirectos asumidos por las familias, quienes deben cubrir cuidadores, adaptaciones en el hogar o incluso estancias en instituciones de cuidados prolongados. Todo ello repercute de manera significativa en economías familiares ya de por sí limitadas y en sistemas sanitarios que enfrentan múltiples demandas. En México, el crecimiento acelerado de la población adulta mayor anticipa un aumento en los costos asociados con esta enfermedad.

Cada diagnóstico de osteoporosis implica seguimiento clínico, estudios de control, tratamiento farmacológico y suplementación, además de la vigilancia de comorbilidades que pueden agravar su evolución. A esto se suman los gastos relacionados con las complicaciones derivadas de la pérdida ósea, como hospitalizaciones y rehabilitación física prolongada.

La evidencia internacional muestra que la osteoporosis no solo representa un riesgo de fractura, sino también una importante causa de dependencia funcional, lo que reduce la autonomía personal y aumenta la demanda de apoyo familiar y social (Salari, Darvishi, et al., 2021). Las personas que viven con osteoporosis avanzada suelen requerir más visitas médicas, cuidados domiciliarios y adaptaciones en su entorno, lo que impacta en la economía doméstica y en los sistemas de salud.

Además, cuando la osteoporosis coexiste con enfermedades crónicas como la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), los costos se multiplican debido a la interacción entre inflamación sistémica, desnutrición y uso prolongado de medicamentos que aceleran la pérdida ósea (Li et al., 2022). Esta combinación no solo incrementa los gastos médicos, sino que agrava la discapacidad y limita las oportunidades de participación social y laboral.

En conjunto, la osteoporosis debe reconocerse como un problema de salud pública con impacto económico y humano, no solo como un factor de riesgo de fractura. Su manejo oportuno, el fortalecimiento de la prevención y la detección temprana son estrategias que pueden reducir significativamente esta carga y mejorar la calidad de vida de la población mayor.

Factores de riesgo

Identificar estos factores es fundamental porque permite reconocer a las personas en mayor riesgo y establecer estrategias de prevención más efectivas. La osteoporosis no se origina por una sola causa; es el resultado de la interacción entre factores biológicos, clínicos y ambientales que

influyen en la pérdida de masa ósea y en la fragilidad del esqueleto. Además de los factores clásicos —como el envejecimiento, la menopausia y el bajo índice de masa corporal—, existen condiciones de salud que incrementan el riesgo de desarrollar la enfermedad y que suelen pasar desapercibidas en la práctica clínica.

Por ello, resulta fundamental que la osteoporosis se aborde desde una perspectiva integral. No basta con atender al paciente cuando ya se han presentado complicaciones. Se requiere fortalecer la prevención, la detección temprana y el manejo oportuno, de modo que se reduzcan las hospitalizaciones, se preserven los años de vida independientes y se alivie la carga para las familias y los sistemas de salud.

Factores no modificables

Entre los elementos que no dependen de la persona destacan la edad, el sexo femenino, la menopausia temprana, los antecedentes familiares de osteoporosis y fractura y el bajo índice de masa corporal (IMC) (Long et al., 2023; Salari, Ghasemi, et al., 2021). La edad es uno de los factores más determinantes: conforme aumenta, los huesos pierden densidad mineral y se vuelven más frágiles. En las mujeres, la menopausia marca un punto crítico, ya que la reducción en la producción de estrógenos acelera la pérdida ósea (Long et al., 2023).

Se ha identificado también que una menarquia tardía (inicio de la menstruación a los 15 años o más) y una menopausia precoz (antes de los 40 años) incrementan de manera significativa el riesgo de fracturas. Por el contrario, una menopausia más tardía (después de los 50 años) se ha asociado con cierto efecto protector (Long et al., 2023).

El bajo IMC también constituye un factor importante. Las personas con bajo peso corporal suelen tener menos tejido óseo y menor protección frente a caídas, lo que las hace más susceptibles a fracturas. Asimismo, los antecedentes familiares de osteoporosis o fracturas osteoporóticas aumentan la probabilidad de desarrollar la enfermedad, lo que refleja la influencia de factores genéticos en la salud ósea.

Factores modificables

Existen otros factores en los que sí es posible intervenir. Entre ellos se encuentran el tabaquismo, el consumo excesivo de alcohol, el sedentarismo, la deficiencia de vitamina D y calcio, así como el uso prolongado de glucocorticoides (Li et al., 2022; Salari, Ghasemi, et al., 2021).

El tabaquismo, además de ser una causa común de múltiples enfermedades crónicas, afecta la salud ósea al reducir la actividad de los osteoblastos, las células responsables de formar hueso. El alcohol en exceso, por su parte, interfiere con la absorción de calcio y vitamina D, además de aumentar el riesgo de caídas.

El sedentarismo constituye otro factor central. La ausencia de actividad física reduce el estímulo mecánico que los huesos necesitan para mantener su resistencia. En contraste, la práctica regular de ejercicio —especialmente aquellos que implican resistencia y carga— ayuda a conservar e incluso a mejorar la densidad mineral ósea (Kemmler et al., 2020; Linhares et al., 2022). La deficiencia de vitamina D y calcio limita la capacidad del organismo para mantener una adecuada mineralización ósea. Aunque este problema puede presentarse en cualquier etapa de la vida, es más común en adultos mayores, quienes suelen tener menor exposición solar y dietas menos equilibradas.

Finalmente, el uso prolongado de glucocorticoides —fármacos frecuentemente indicados para enfermedades inflamatorias como el asma o la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), la artritis reumatoide, entre otras— también incrementa de manera notable el riesgo de osteoporosis. Este efecto es particularmente preocupante porque muchos pacientes que requieren estos tratamientos ya presentan factores de riesgo adicionales, como bajo peso, inflamación crónica o deficiencia de vitamina D (Li et al., 2022).

La interacción de factores

Lo más relevante es que los factores de riesgo rara vez actúan de manera aislada. Es común que una misma persona acumule varios de ellos, lo

que eleva de manera exponencial la probabilidad de desarrollar osteoporosis y sufrir una fractura. Un ejemplo claro es la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), en la que la prevalencia de osteoporosis puede llegar hasta un 38%. En la Figura 1 se ejemplifican factores que influyen en el riesgo de desarrollo de osteoporosis, como por ejemplo el tabaquismo como causa común, la deficiencia de vitamina D, el bajo peso corporal, la falta de actividad física, y el uso prolongado de medicamentos como los glucocorticoides. Estos pacientes también presentarán un riesgo aún mayor de fracturas, lo que se traduce en un peor pronóstico clínico y en una mayor mortalidad (Li et al., 2022).

Enfermedades como la diabetes mellitus y la hipertensión arterial, se han asociado con una disminución de la densidad mineral ósea y mayor riesgo de osteoporosis. La hiperglucemia crónica puede alterar el metabolismo del colágeno y del calcio,

mientras que la hipertensión se vincula con cambios en la microcirculación ósea, lo que contribuye al debilitamiento del tejido óseo e incrementa la susceptibilidad a las fracturas (Long et al., 2023). Estas comorbilidades agravan el panorama, ya que muchos adultos mayores viven con varias condiciones crónicas al mismo tiempo, lo que complica el tratamiento y eleva los riesgos asociados a la inmovilidad o a la hospitalización prolongada.

Otras enfermedades crónicas, como la artritis reumatoide o la insuficiencia renal, también se relacionan con la pérdida ósea.

Por esta razón, la evaluación clínica debe contemplar un enfoque integral que considere tanto los factores modificables como los no modificables. Reconocer la interacción entre ellos permite diseñar intervenciones personalizadas y más efectivas, orientadas no solo a retrasar la pérdida ósea, sino también a prevenir caídas y fracturas.



Figura 1. Factores de riesgo de osteoporosis. Representación visual de los factores de riesgo asociados al desarrollo de osteoporosis. Tomado de "La Razón México". URL del artículo: <https://www.larazon.es/salud/20221020/e3k-qncesmbhcriqivoylnli3qqq.html>

Diagnóstico de la osteoporosis

El diagnóstico de la osteoporosis se basa en herramientas sencillas. La prueba más utilizada a nivel mundial y avalada por la Organización Mundial de la Salud (OMS) es la densitometría ósea o DXA (absorciometría de rayos X de energía dual). Este estudio mide la cantidad de mineral presente en los huesos, y se puede realizar en la columna lumbar, la cadera, y el antebrazo, que son las zonas más afectadas (Camacho et al., 2020); como podemos observar en la figura 2, donde en la imagen superior o imagen A, se muestran las zonas de donde se toma, mediante un

tipo de radiografía, la densidad del hueso, para posteriormente, realizar un puntaje especial llamado T-score o Z-score, mientras que en la misma figura 2, pero en la imagen inferior o imagen B mostramos la interpretación de estos puntajes en una gráfica tipo semáforo, donde en verde se tiene masa ósea normal, en amarillo, masa ósea baja y en rojo, la zona de osteoporosis.

Este estudio es rápido, indoloro y constituye la principal herramienta para el diagnóstico temprano de la pérdida ósea.

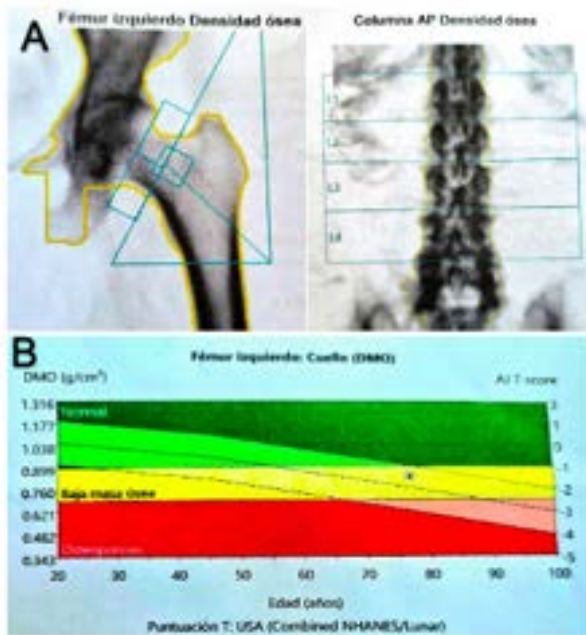


Figura 2. A) Se observan las zonas donde se aplican los rayos X, para la evaluación de la densidad mineral ósea reconocida y establecida como método principal por la Organización Mundial de la Salud en la cadera (cabeza y cuello del fémur) y columna lumbar (vértebras L1 a L4). B) La aplicación de la escala de densidad mineral ósea (T Score) con las desviaciones estándar según grupos de edad; un nivel por debajo o igual a -2.5 desviaciones estándar es diagnóstico de osteoporosis. En este ejemplo la persona se encuentra con densidad mineral ósea disminuida. Foto de nuestra autoría

Por otra parte, existen herramientas clínicas que ayudan a estimar el riesgo de fractura en los próximos 10 años y que solo requieren una serie de preguntas. Una de las más conocidas es el FRAX, que integra factores como edad, sexo, peso, antecedentes familiares y hábitos de vida para calcular la probabilidad de sufrir una fractura (Camacho et al., 2020). Este tipo de evaluaciones es útil porque permite identificar a personas que podrían beneficiarse de un seguimiento más cercano o del inicio de medidas preventivas específicas.

El diagnóstico temprano abre una ventana de oportunidad: posibilita implementar cambios en el estilo de vida, iniciar suplementación o, si es necesario, considerar tratamiento médico antes de que ocurra una fractura (Camacho et al., 2020). De esta manera, la densitometría ósea y las herramientas de riesgo no solo sirven para clasificar a los pacientes, sino también para prevenir la discapacidad y mejorar la calidad de vida en la población mayor.

Prevención y tratamiento. Estilo de vida y ejercicio

La osteoporosis es prevenible y tratable. A diferencia de otras enfermedades crónicas, existen múltiples estrategias que han demostrado eficacia para disminuir la pérdida ósea, reducir el riesgo de fracturas y mejorar la calidad de vida. Estas estrategias incluyen desde cambios en el estilo de vida hasta tratamientos farmacológicos avanzados.

El ejercicio físico desempeña un papel central. La evidencia demuestra que los programas de entrenamiento multicomponente, que combinan ejercicios de fuerza, equilibrio, flexibilidad y actividad aeróbica, mejoran la capacidad funcional y la salud en la densidad ósea de la columna lumbar y la cadera en mujeres mayores (Kemmler et al., 2020; Linhares et al., 2022). De forma similar, el ejercicio con resistencia y carga —como caminar, subir escaleras o llevar a cabo ejercicios con peso corporal— estimula el hueso y contribuye a mantener o incrementar la densidad mineral ósea (Kemmler et al., 2020). Estos programas, cuando se desarrollan en entornos comunitarios, no solo benefician la salud física, sino también el bienestar social y emocional.

Esto es especialmente relevante porque una caída es muchas veces el evento desencadenante de una fractura osteoporótica.

La OMS ha señalado que el ejercicio debe ser una recomendación universal en la población mayor de 65 años, tanto por sus beneficios óseos como por su impacto positivo en la salud cardiovascular, metabólica y mental (Linhares et al., 2022). De modo que mantenerse físicamente activo no solo fortalece los huesos, sino que también contribuye a conservar la autonomía y la calidad de vida en la vejez.

Suplementación

La nutrición es otro componente esencial en la salud ósea. Dos de los micronutrientes más estudiados son el calcio y la vitamina D, ya que desempeñan un papel central en la mineralización y mantenimiento de los huesos.

Calcio + vitamina D en adultos mayores: La combinación de ambos nutrientes ha demostrado reducir el riesgo de fracturas en adultos de mediana edad y mayores. Diferentes estudios muestran que esta suplementación disminuye en un 15% las fracturas totales y en un 30% las fracturas de cadera (Weaver et al., 2016). Estos resultados confirman que la suplementación es eficaz, sobre todo en poblaciones institucionalizadas o con baja ingesta de calcio.

Calcio y/o vitamina D en mujeres premenopáusicas: En este grupo, la evidencia es diferente. Estudios recientes concluyen que ni el calcio ni la vitamina D —administrados de manera aislada o combinada— generan beneficios clínicamente significativos en la densidad mineral ósea (Méndez-Sánchez et al., 2023). Esto sugiere que la suplementación debe adaptarse a la edad y las condiciones particulares de cada persona, evitando un uso indiscriminado.

Vitamina K2: La vitamina K2 ha cobrado interés como suplemento en mujeres posmenopáusicas, ya que contribuye a mantener y mejorar la densidad ósea lumbar y puede reducir el riesgo de fracturas (Ma et al., 2022). Además, se asocia con una disminución de la osteocalcina

no carboxilada, un marcador de metabolismo óseo. Si bien no sustituye a los Tratamientos convencionales, la vitamina K2 puede considerarse un complemento prometedor.

En conjunto, la suplementación con calcio, vitamina D y vitamina K2, cuando se aplica en los grupos adecuados, representa una estrategia accesible y de bajo costo para reducir la carga de la osteoporosis. Por otra parte, cuando se habla de salud ósea, la atención suele centrarse en el calcio y la vitamina D. Sin embargo, el magnesio es otro mineral esencial que muchas veces pasa desapercibido. Este nutriente participa en más de 300 reacciones enzimáticas del organismo, varias de ellas relacionadas con la formación y el mantenimiento del hueso. Además, interviene en la activación de la vitamina D y en procesos celulares que regulan la remodelación ósea (Rondanelli et al., 2021).

Diversos estudios han mostrado que la deficiencia de magnesio puede afectar la calidad del hueso, favorecer procesos inflamatorios y aumentar el riesgo de osteoporosis. De hecho, investigaciones recientes han encontrado que los adultos mayores con mayor consumo de magnesio presentan una mayor densidad mineral ósea en cadera y cuello femoral, en comparación con quienes tienen ingestas bajas. Aunque la evidencia sobre fracturas aún es limitada, los hallazgos sugieren que una

dieta suficiente en magnesio puede contribuir a la salud ósea a largo plazo (Rondanelli et al., 2021). En términos prácticos, esto significa que, además de calcio y vitamina D, la alimentación debe incluir fuentes ricas en magnesio, como verduras de hoja verde, frutos secos, semillas, legumbres y cereales integrales, como se observa en la Figura 3. Estos alimentos, incorporados a la dieta cotidiana, ayudan no solo a los huesos, sino también al funcionamiento muscular y cardiovascular. Así, la prevención de la osteoporosis no depende de un solo nutriente, sino de la suma de varios factores en el estilo de vida (Rondanelli et al., 2021).

En adultos mayores, la ingesta de magnesio adquiere aún más relevancia. Una revisión sistemática y metaanálisis reciente concluyó que las personas con mayor consumo de magnesio presentaron hasta un 2–3% más de densidad mineral ósea en cadera y cuello femoral, comparadas con quienes consumían menos (Groenendijk et al., 2022). Este hallazgo subraya la importancia de promover dietas variadas y equilibradas en los adultos mayores. Incorporar alimentos ricos en magnesio junto con calcio, vitamina D y proteínas puede marcar la diferencia entre mantener huesos resistentes y enfrentar mayor riesgo de fragilidad. El mensaje para la población general es sencillo: no basta con preocuparse solo por el calcio; también debemos prestar atención al magnesio como aliado de la salud ósea (Groenendijk et al., 2022).



Figura 3. Alimentos ricos en calcio. Representación visual de los alimentos con alto aporte de calcio. Elaboración propia basada en la revisión de datos.

Tratamiento farmacológico

El tratamiento de la osteoporosis ha evolucionado en las últimas décadas, pasando de enfoques centrados únicamente en prevenir fracturas a estrategias más amplias que buscan restaurar la salud del hueso y mejorar su calidad estructural. Actualmente, los tratamientos se dividen en dos grandes grupos: aquellos que reducen la pérdida de masa ósea y los que estimulan la formación de hueso nuevo. Dentro de ellos se encuentran medicamentos que ayudan a disminuir la cantidad de hueso perdido, los que forman hueso y los que tienen ambas acciones. La elección del tipo de medicamento dependerá del momento en el que se diagnostique la osteoporosis, por ejemplo, en posmenopausia o premenopausia, así como del riesgo de fractura o el antecedente de fractura, entre otros.

Más allá de la farmacología, un reto frecuente es la adherencia al tratamiento. Muchas personas suspenden sus terapias al no percibir síntomas o por miedo a efectos secundarios. Por ello, los programas educativos y el seguimiento médico son esenciales para mantener la continuidad terapéutica. En este sentido, la atención integral de la osteoporosis debe combinar la educación del paciente, el monitoreo periódico de densitometrías y la revisión conjunta de tratamientos para garantizar que cada intervención sea eficaz y segura.

Conocer las opciones disponibles y sus mecanismos de acción permite al paciente participar activamente en su cuidado. El objetivo no es solo prevenir fracturas, sino preservar la masa ósea, la movilidad y la calidad de vida, promoviendo un envejecimiento saludable y funcional.

Prevención comunitaria y políticas públicas

Más allá de las medidas individuales, la osteoporosis requiere un enfoque comunitario. Programas que promuevan la actividad física en adultos mayores, campañas de educación sobre nutrición y acceso a suplementación básica son intervenciones costo-efectivas que pueden implementarse desde los servicios de salud. Asimismo, es indispensable fortalecer la detec-

ción temprana mediante pruebas de densitometría ósea, especialmente en mujeres posmenopáusicas y en hombres mayores con factores de riesgo acumulados. De esta manera, se puede iniciar el tratamiento antes de que ocurra la primera fractura, lo que marca la diferencia entre envejecer con independencia y con discapacidad.

La situación en México y la importancia de investigar

En México, la osteoporosis no solo degenera en fracturas, hospitalizaciones y procedimientos quirúrgicos, sino también en largos periodos de rehabilitación, pérdida de independencia y aumento de la mortalidad en personas mayores.

Más allá de las cifras, lo preocupante es que la osteoporosis aún no ocupa un lugar prioritario en la agenda de salud pública del país. A diferencia de enfermedades cardiovasculares, diabetes o cáncer, la osteoporosis suele considerarse una consecuencia “natural” del envejecimiento, lo que contribuye a subestimarla. Esta percepción errónea retrasa la implementación de programas de prevención, detección temprana y manejo oportuno.

La realidad es que la osteoporosis es prevenible y tratable y que sus consecuencias no son inevitables. Países que han implementado estrategias nacionales de prevención —como programas de detección sistemática con densitometría ósea, suplementación en grupos de riesgo y campañas de ejercicio comunitario— han logrado reducir de manera significativa la incidencia de fracturas y sus complicaciones. En México, avanzar en esa dirección es urgente.

La investigación local desempeña un papel clave en este proceso. Generar evidencia propia permitirá no solo dimensionar con mayor precisión la magnitud de la osteoporosis en la población mexicana, sino también identificar particularidades regionales, diferencias entre hombres y mujeres y variaciones según nivel socioeconómico o acceso a servicios de salud. Este conocimiento es indispensable para diseñar políticas públicas adaptadas al contexto nacional.

Un ejemplo de la importancia de la investigación nacional es el análisis de tendencias de mortalidad por fracturas osteoporóticas. Conocer cómo ha cambiado la mortalidad en las últimas décadas, qué regiones concentran el mayor número de casos y cuáles son los grupos de edad más afectados permitirá detectar inequidades en la atención y establecer prioridades de intervención. Además, este tipo de estudios ofrece insumos para evaluar la efectividad de los programas ya existentes y proponer nuevas estrategias basadas en evidencia.

La falta de reconocimiento institucional de la osteoporosis como un problema de salud grave el cual puede conducir a la presentación de fracturas graves como lo muestra la imagen 4. Cada fractura implica costos directos por hospitalización, cirugía y rehabilitación, además de costos indirectos como pérdida de productividad, necesidad de cuidadores y adaptación de los hogares. En ausencia de programas de prevención y diagnóstico oportuno, estos costos seguirán en aumento y recaerán tanto en las

familias como en los servicios públicos de salud. Por todo lo anterior, resulta indispensable que México coloque a la osteoporosis en el centro de sus políticas de salud para adultos mayores. Es necesario impulsar campañas de sensibilización dirigidas a la población general, capacitar al personal de salud en la detección temprana, garantizar el acceso a densitometrías óseas en las instituciones públicas y facilitar la disponibilidad de tratamientos efectivos.

La osteoporosis es una enfermedad silenciosa, pero sus consecuencias son ruidosas y devastadoras. México se encuentra en un punto de oportunidad: si se actúa hoy con prevención, diagnóstico e investigación, es posible evitar que en las próximas décadas la carga de fracturas se convierta en una crisis sanitaria de gran magnitud. Reconocer la importancia de este problema y actuar en consecuencia es el primer paso para proteger la calidad de vida de millones de personas que hoy envejecen en nuestro país.



Figura 4. Complicaciones y consecuencias de osteoporosis. Las fracturas de cadera presentan el mayor índice de mortalidad dadas las complicaciones en el tratamiento, discapacidad parcial o permanente y otras comorbilidades. Obtenidas en colaboración con el Hospital Universitario de Puebla

Conclusiones

La osteoporosis es un problema de salud pública silencioso, pero de enorme impacto. Aunque no presenta síntomas evidentes en sus etapas iniciales, sus consecuencias se manifiestan en fracturas que limitan la movilidad, reducen la independencia y generan un profundo deterioro en la calidad de vida. Estas complicaciones no solo afectan a las personas y a sus familias, sino que también representan una carga creciente para los sistemas de salud.

Lejos de ser un destino inevitable del envejecimiento, la osteoporosis puede prevenirse y tratarse si se actúa a tiempo. La promoción de la actividad física, especialmente de ejercicios que combinan fuerza, equilibrio y carga, constituye una de las medidas más efectivas para mantener la salud ósea. A ello se suman una alimentación adecuada, la suplementación dirigida en poblaciones de riesgo y el acceso a opciones tera-

péuticas modernas que han demostrado mayor eficacia en la reducción de fracturas. En México, la situación demanda especial atención. El rápido envejecimiento de la población anticipa un incremento considerable en el número de fracturas durante las próximas décadas. Esto hace indispensable fortalecer la investigación nacional, ampliar los programas de detección temprana y consolidar políticas públicas que prioricen la prevención y el tratamiento oportuno.

Reconocer la osteoporosis como un desafío prioritario abre la posibilidad de transformar un panorama preocupante en una oportunidad de cambio. Con estrategias basadas en evidencia, educación a la población y compromiso institucional, es posible disminuir el impacto de la enfermedad y garantizar que más personas puedan envejecer con salud, independencia y calidad de vida.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Declaración de privacidad

Los datos personales facilitados por los autores a **RD-ICUAP** se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Los autores se descargan de responsabilidad (INTELIGENCIA ARTIFICIAL) Los autores declaran por la presente que NO se han utilizado tecnologías de IA generativa, tales como modelos de lenguaje grandes (ChatGPT, COPILOT, etc.) y generadores de texto a imagen, durante la redacción o edición de este manuscrito.

Agradecimientos

A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), al Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) y a las directoras de tesis por su orientación y apoyo en la elaboración de este trabajo.

Referencias

- Barros-Sevillano, S., Espinoza-Martínez, D., & Rubio-Zavaleta, L. (2023). What is known about osteoporosis research in Latin America?: A bibliometric analysis of three decades. *Medicine (United States)*, 102(48), E36103. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000036103>
- Camacho, P. M., Petak, S. M., Binkley, N., Diab, D. L., Eldeiry, L. S., Farooki, A., Harris, S. T., Hurley, D. L., Kelly, J., Michael Lewiecki, E., Pessah-Pollack, R., McClung, M., Wimalawansa, S. J., & Watts, N. B. (2020). American association of clinical endocrinologists/American college of endocrinology clinical practice guidelines for the diagnosis and treatment of postmenopausal osteoporosis-2020 update. In *Endocrine Practice* (Vol. 26, Issue s1, pp. 1–46). American Association of Clinical Endocrinologists. <https://doi.org/10.4158/GL-2020-0524SUPPL>
- Clark, P., Caló, M., Torres-Naranjo, J. F., Cisneros-Dreinhofer, F., Silveira-Torre, L. H., Tapia-Hernández, M., Medina-Chávez, J. H., Gutiérrez-Robledo, L. M., Reza-Albarrán, A. A., Coronado-Zarco, R., de León, A. O. G., de los Ángeles Soria-Bastida, M., Islas-Upegui, M. M., Tejeda-Chávez, E. S., López-Cervantes, R. E., & Jiménez-Herrera, B. L. (2024). Osteoporosis and Fragility Fractures in Mexico: A Call to Action. *Archives of Medical Research*, 55(7). <https://doi.org/10.1016/j.arcmed.2024.103062>
- Clark, P., Cons-Molina, F., Deleze, M., Ragi, S., Haddock, L., Zanchetta, J. R., Jaller, J. J., Palermo, L., Talavera, J. O., Messina, D. O., Morales-Torres, J., Salmeron, J., Navarrete, A., Suarez, E., Pérez, C. M., & Cummings, S. R. (2009). The prevalence of radiographic vertebral fractures in Latin American countries: The Latin American Vertebral Osteoporosis Study (LAVOS). *Osteoporosis International*, 20(2), 275–282. <https://doi.org/10.1007/s00198-008-0657-4>
- Clark, P., & Tamayo, J. (2013). Epidemiology of osteoporosis in Mexico. Present and future directions. *Revista de Investigación Clínica*, 65(2), 183–191. <https://www.researchgate.net/publication/248703556>
- Groenendijk, I., van Delft, M., Versloot, P., van Loon, L. J. C., & de Groot, L. C. P. G. M. (2022). Impact of magnesium on bone health in older adults: A systematic review and meta-analysis. *Bone*, 154. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2021.116233>
- Händel, M. N., Cardoso, I., Von Bülow, C., Rohde, J. F., Ussing, A., Nielsen, S. M., Christensen, R., Body, J. J., Brandi, M. L., Díez-Pérez, A., Hadji, P., Javaid, M. K., Lems, W. F., Noguez, X., Roux, C., Minisola, S., Kurth, A., Thomas, T., Prieto-Alhambra, D., ... Abrahamsen, B. (2023). Fracture risk reduction and safety by osteoporosis treatment compared with placebo or active comparator in postmenopausal women: systematic review, network meta-analysis, and meta-regression analysis of randomised clinical trials. *BMJ*. <https://doi.org/10.1136/bmj-2021-068033>
- Kemmler, W., Shojaa, M., Kohl, M., & von Stengel, S. (2020). Effects of Different Types of Exercise on Bone Mineral Density in Postmenopausal Women: A Systematic Review and Meta-analysis. In *Calcified Tissue International* (Vol. 107, Issue 5, pp. 409–439). Springer. <https://doi.org/10.1007/s00223-020-00744-w>
- Li, Y., Gao, H., Zhao, L., & Wang, J. (2022). Osteoporosis in COPD patients: Risk factors and pulmonary rehabilitation. *Clinical Respiratory Journal*, 16(7), 487–496. <https://doi.org/10.1111/crj.13514>
- Linhares, D. G., Borba-Pinheiro, C. J., Castro, J. B. P. de, Santos, A. O. B. dos, Santos, L. L. dos, Cordeiro, L. de S., Drigo, A. J., Nunes, R. de A. M., & Vale, R. G. de S. (2022). Effects of Multicomponent Exercise Training on the Health of Older Women

- with Osteoporosis: A Systematic Review and Meta-Analysis. In *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 19, Issue 21). MDPI. <https://doi.org/10.3390/ijerph192114195>
- Long, G., Liu, C., Liang, T., Zhang, Z., Qin, Z., & Zhan, X. (2023). Predictors of osteoporotic fracture in postmenopausal women: a meta-analysis. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, 18(1). <https://doi.org/10.1186/s13018-023-04051-6>
- Ma, M.-I., Ma, Z.-J., Sun, H., He, Y., B.-j, R., W.-d, Z., S.-x, L., Dong, H., & Wang, Y. (2022). Efficacy of vitamin K2 in the prevention and treatment of postmenopausal osteoporosis: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Frontiers in Public Health*, 1–13. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.979649>
- Méndez-Sánchez, L., Clark, P., Winzenberg, T. M., Tugwell, P., Correa-Burrows, P., & Costello, R. (2023). Calcium and vitamin D for increasing bone mineral density in premenopausal women. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2023(1). <https://doi.org/10.1002/14651858.CD012664.pub2>
- Rondanelli, M., Faliva, M. A., Tartara, A., Gasparri, C., Perna, S., Infantino, V., Riva, A., Petrangolini, G., & Peroni, G. (2021). An update on magnesium and bone health. In *BioMetals* (Vol. 34, Issue 4, pp. 715–736). Springer Science and Business Media B.V. <https://doi.org/10.1007/s10534-021-00305-0>
- Rosales-Aujang E, Muñoz-Enciso JM, & Arias-Ulloa R. (2014). Prevalencia de osteopenia y osteoporosis en mujeres posmenopáusicas y su relación con factores de riesgo. *Ginecología y Obstetricia de México*, 82(4), 223–228.
- Salari, N., Darvishi, N., Bartina, Y., Larti, M., Kiaei, A., Hemmati, M., Shohaimi, S., & Mohammadi, M. (2021). Global prevalence of osteoporosis among the world older adults: a comprehensive systematic review and meta-analysis. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, 16(1). <https://doi.org/10.1186/s13018-021-02821-8>
- Salari, N., Ghasemi, H., Mohammadi, L., Behzadi, M. hasan, Rabieenia, E., Shohaimi, S., & Mohammadi, M. (2021). The global prevalence of osteoporosis in the world: a comprehensive systematic review and meta-analysis. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, 16(1). <https://doi.org/10.1186/s13018-021-02772-0>
- Singh, S., Dutta, S., Khasbage, S., Kumar, T., Sachin, J., Sharma, J., & Varthya, S. B. (2022). A systematic review and meta-analysis of efficacy and safety of Romosozumab in postmenopausal osteoporosis. In *Osteoporosis International* (Vol. 33, Issue 1). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s00198-021-06095-y>
- Weaver, C. M., Alexander, D. D., Boushey, C. J., Dawson-Hughes, B., Lappe, J. M., LeBoff, M. S., Liu, S., Looker, A. C., Wallace, T. C., & Wang, D. D. (2016). Calcium plus vitamin D supplementation and risk of fractures: an updated meta-analysis from the National Osteoporosis Foundation. *Osteoporosis International*, 27(1), 367–376. <https://doi.org/10.1007/s00198-015-3386-5>

Recepción: 25.10.2025

Revisión: 06.11.2025

Publicación: 08.05.2026

<https://orcid.org/0000-0002-6331-5953>

<https://orcid.org/0000-0002-7115-968X>

<https://orcid.org/0009-0008-8499-209X>

<https://orcid.org/0000-0003-4922-848X>

<https://orcid.org/0000-0001-9839-982X>

VALIDEZ Y FIABILIDAD: CLAVES PARA EL DESARROLLO DE UN CUESTIONARIO COMO INSTRUMENTO DE MEDICIÓN CONFIABLE

VALIDITY AND RELIABILITY: KEYS TO THE DEVELOPMENT A QUESTIONNAIRE AS A RELIABLE MEASUREMENT INSTRUMENT

Jazmín Zaragoza-Alonso ⁽¹⁾,
José Muñoz Flores ⁽¹⁾,
Fátima Andrea Bonilla Ramos ⁽²⁾,
María Elena Ramos Cassellis ⁽³⁾,
Jesús Andrés Arzola Flores ⁽³⁾*

⁽¹⁾ Posgrado en Ciencias Ambientales, Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Ciudad Universitaria, Puebla, C.P. 72570.

⁽²⁾ Maestría en Manejo Sostenible de Agroecosistemas, CENAGRO, Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Carretera a San Baltazar Tetela km 1.7, Ecocampus Valsequillo, San Pedro Zacachimalpa, Puebla, México. C.P.72960.

⁽³⁾ Facultad de Ingeniería Química, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Avenida San Claudio y 18 Sur, Ciudad Universitaria, Puebla, C.P. 72570

*Autor de correspondencia:

jesus.arzolaflores@correo.buap.mx. Tel. (221) 203 8067
za224570202@alm.buap.mx, mf224570198@alm.buap.mx, br224470530@alm.buap.mx, cassellis71@yahoo.com.mx, jesus.arzolaflores@correo.buap.mx*

Resumen

La fiabilidad y la validez son elementos fundamentales en la creación de instrumentos de medición, ya que garantizan la calidad y precisión de los datos obtenidos. La fiabilidad se refiere al grado en que se obtienen resultados consistentes y estables a lo largo del tiempo. Mientras que la validez indica qué tan bien se mide lo que se pretende medir. Ambas aseguran que los resultados sean representativos y útiles para el propósito del estudio. Además, están estrechamente relacionadas: un instrumento puede ser confiable pero no válido; sin embargo, no puede ser válido si no es confiable. Por esto, es crucial evaluar diferentes tipos de validez y de fiabilidad. Este trabajo aborda la importancia de evaluar la fiabilidad y validez de un cuestionario, ya que es fundamental para obtener información precisa, comparable y de calidad. Asimismo, se presentan recomendaciones para su diseño, desarrollo y evaluación, así como descripciones de softwares y herramientas para realizar las pruebas estadísticas que permiten medir la validez y la fiabilidad.

Palabras clave: *fiabilidad, validez, cuestionario, escala psicométrica, software*

Abstract

Reliability and validity are fundamental elements in the creation of measurement instruments, as they guarantee the quality and accuracy of the data obtained. Reliability refers to the degree to which consistent and stable results are produced over time. While validity indicates how well it measures what it is intended to measure. Both ensure that the results are representative and useful for the purpose of the study. Moreover, they are closely related: an instrument can be reliable but not valid, however, it cannot be valid if it is not reliable. Therefore, it is crucial to evaluate different types of validity and reliability. This paper addresses the importance of assessing the reliability and validity of a questionnaire, as it is essential to obtain accurate, comparable, and quality information. It also provides recommendations for designing, developing and evaluating, as well as descriptions of software and tools to perform statistical tests to measure validity and reliability.

Keywords: *reliability, validity, questionnaire, psychometric scale, software*

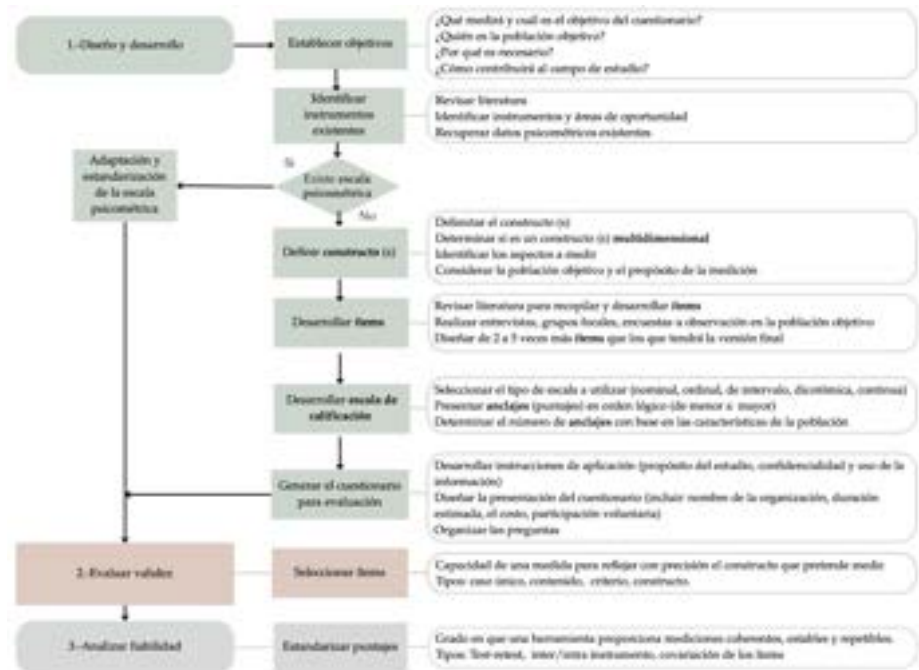
Introducción

En cualquier disciplina que involucre la obtención de información —ya sea en ciencias sociales, salud, ingeniería o educación— es fundamental asegurarse de que el instrumento de medición realmente mida lo que debe medir y si la información recolectada es confiable y repetible (Bolarinwa, 2015). Si un cuestionario, un sensor o una escala psicométrica no mide con precisión lo que debe medir (**validez**) o si sus resultados varían sin razón aparente (**fiabilidad**), los datos recopilados pueden ser erróneos o engañosos (Phillips et al., 2021; Taherdoost, 2016).

El cuestionario se ha convertido en el instrumento de recolección de datos más empleado para obtener información relevante, precisa y

confiable en distintas áreas como salud, economía, psicología, educación e investigación conductual (Bolarinwa, 2015; Taherdoost, 2016; Yusoff et al., 2021). Debido a sus múltiples ventajas permite recopilar información de una gran población con el anonimato de los participantes, con costo y tiempo menores, con preguntas estandarizadas y sin el sesgo del encuestador (Elangovan & Sundaravel, 2021). Sin embargo, si el cuestionario tiene un desarrollo deficiente, las preguntas son incompletas, imprecisas o mal redactadas, no se podrá obtener información de calidad y por ende la investigación será inadecuada (Elangovan & Sundaravel, 2021; Yusoff et al., 2021).

Figura 1 Proceso para diseñar, desarrollar y evaluar un cuestionario



Nota. Elaboración propia con base en: (Phillips et al., 2021; Swan et al., 2023; Taherdoost, 2022; Yusoff et al., 2021).

¿Cuándo se debe probar la **validez y fiabilidad** de un cuestionario? Siempre que se desarrolle uno nuevo o se adapte alguno (Bolarinwa, 2015), ya que los existentes no se ajustan a la población objetivo, no responden al problema de investigación o las propiedades psicométricas (**validez y fiabilidad**) de la escala no son consistentes (Swan et al., 2023). En muchas áreas la información recolectada sirve para tomar decisiones y ahí radica la importancia de un instrumento de medición confiable.

En ocasiones se desconoce el proceso para su diseño, así como las pruebas estadísticas que

deben ser usadas para asegurar su **validez y fiabilidad**, el software a emplear y si este es gratuito o de licencia. Resultando fundamental asegurar el correcto diseño, desarrollo y evaluación para obtener un cuestionario y datos de calidad a través de una planificación sistemática rigurosa (Elangovan & Sundaravel, 2021; Yusoff et al., 2021). Este artículo expone el proceso que debe seguirse a partir del diseño hasta su evaluación (ver figura 1.), expone qué son la validez y la fiabilidad, además de comparar distintos softwares y herramientas para su análisis.

Diseño y desarrollo de un cuestionario

Un cuestionario es un instrumento con un conjunto de preguntas, declaraciones o palabras estímulo predeterminados que permiten medir un **constructo** (una idea abstracta precisa, delimitada que es intangible pero puede medirse y analizarse) o varios a través de una **escala psicométrica** (una medida cuantitativa que mide a los participantes del estudio con relación al **constructo**) como la escala de Neofobia Alimentaria o la de Rechazo a las Alternativas Cárnicas, siempre debe tener una intención relacionada con el objetivo de la investigación y debe permitir recolectar información de calidad (Bolarinwa, 2015; Elangovan & Sundaravel, 2021; Robinson, 2018).

En la etapa de diseño y desarrollo, primero se deben establecer los objetivos del cuestionario, saber qué medirá (conceptos, características o rasgos de alguien o algo), conocer quiénes son la población objetivo (productores, estudiantes, consumidores, pacientes), determinar cuál es la necesidad de su desarrollo y cómo contribuirá en el área de estudio para evitar duplicar un instrumento existente (Yusoff et al., 2021). Si existe la **escala psicométrica**, suele ser necesario evaluar sus **propiedades psicométricas** (propiedades de medición: **validez y fiabilidad**) o adaptarla para una población o contexto cultural distinto al que se ha empleado (Swan et al., 2023).

Figura 2 Componentes de una escala psicométrica

Ítem					
Preguntas o enunciados	Escala de calificación			Puntos de respuesta	
	Totalmente en desacuerdo	En desacuerdo	Neutral	De acuerdo	Totalmente de acuerdo
1.-Me preocupa el medio ambiente	☐	☐	☐	☐	☐
2.-Proteger el medio ambiente aumenta mi calidad de vida	☐	☐	☐	☐	☐

Nota. Adaptado de Robinson (2018).

La **escala psicométrica** está conformada por ciertos elementos que tienen una función específica (Figura 2.). Comprende múltiples **ítems** (preguntas o enunciados que representan un aspecto del **constructo** que se está evaluando y que se mide cada uno con una **escala de calificación**) que generan datos paramétricos que deben cumplir con **propiedades psicométricas** (Robinson, 2018; Swan et al., 2023).

Para generar los **ítems** se recomienda hacer una revisión de literatura y considerar a actores clave de la población de estudio, esto permite una base teórica sólida, así como la inclusión de la perspectiva de las personas a investigar. Es importante considerar que la calidad de la **escala psicométrica** depende de la calidad de los **ítems** (Swan et al., 2023), en la tabla 1 se presentan recomendaciones para su diseño. Respecto al número de **ítems** Yusoff

et al. (2021) recomiendan 10 por atributo para la etapa de desarrollo, Robinson (2018) 4 y Swan et al. (2023) entre 2 y 5 veces más que la versión final.

Es importante considerar desarrollar un cuestionario que implique menos de 15 minutos para contestarse (Yusoff et al., 2021), ya que las preguntas, declaraciones y respuestas más fáciles de contestar generan los datos más concisos (Krosnick, 2018). Debido a que las preguntas son la forma en que se obtendrá la información y la calidad de las respuestas dependen de su diseño, esté debe realizarse correctamente, “las buenas preguntas son **fiables** (proporcionan medidas consistentes en situaciones comparables) y **válidas** (las respuestas corresponden a lo que se pretende medir)” (Fowler, 2009, p.87 en Bourke, 2016) por lo que en la Tabla 2 se presentan consejos para su redacción.

Tabla 1 Recomendaciones para redactar ítems

Recomendaciones	
✓	Redacción clara y lo más corta posible
✓	Simple y directo para vincularse con la escala de calificación
✓	Lenguaje no ambiguo, considerando el nivel educativo de la población objetivo
✓	Un concepto por ítem
✓	Redundancia o similitud de los ítems para asegurar una cobertura total del constructo
✓	La redacción debe estar libre de sesgos culturales
✓	Evitar dobles negaciones
✓	Evitar redacción negativa o codificación inversa (algunas veces se usa para evitar aquiescencia o el sesgo de respuesta extrema, siempre debe justificarse su inclusión).

Nota. Elaboración propia con base en (Dueber et al., 2022; Swan et al., 2023; Yusoff et al., 2021).

La elección de la **escala calificación o de respuesta** permite garantizar adecuadas **propiedades psicométricas** comparadas con escalas de acuerdo-desacuerdo por lo que su elección es vital para obtener información de calidad (DeCastellarnau, 2018). Además, muestra el diseño, formato, redacción y mide la respuesta de los participantes a cada pregunta o enunciado (Robinson, 2018; Swan et al., 2023). Para su diseño, debe considerarse que las escalas largas son ambiguas (Krosnick, 2018a), por lo que el número de anclajes o puntajes de respuesta recomendado es de 7 o 9.

Aunque la extensión depende de varios factores. Por ejemplo, de la población objetivo (menores para niveles educativos bajos como niños y mayores para personas con educación superior o

posgrado) (Swan et al., 2023). Del espacio de visualización de respuesta, en teléfonos inteligentes se recomiendan 5 anclajes (Robinson, 2018). Según la polaridad del constructo, si este es **bipolar** (es decir, va de un punto positivo a un negativo y tiene un punto neutral) la escala debe ser bipolar y debe tener 7 puntos. Por el contrario, si el constructo es **unipolar** (va de cero a un punto máximo, sin punto neutral) debe ser unipolar y tener 5 puntos, esto evita sesgar los datos al polo positivo o negativo y maximizar la discriminación sin comprometer la fiabilidad (DeCastellarnau, 2018; Krosnick, 2018a). También es importante considerar que la fiabilidad es mayor con escalas unipolares que bipolares (DeCastellarnau, 2018). Lo anterior muestra la relevancia de realizar una profunda revisión de literatura para la elección correcta de la escala de acuerdo con las características del estudio.

Tabla 2 Recomendaciones y ejemplos para redactar preguntas

Recomendación	Pregunta incorrecta	Pregunta correcta
✓ Las preguntas deben cumplir con el objetivo de la investigación		
✓ Incluir preguntas de filtro		
✓ Simple, directa, comprensible	Con base en su fecha de nacimiento, ¿cuál es su edad, actualmente?	¿Cuántos años tiene?
✓ Sin jerga (lenguaje informal entre un grupo de personas) o lenguaje técnico	¿Cuál es la huella hídrica de un refresco?	¿Cuánta agua se necesita para producir un refresco?
✓ Ser específico	¿Cómo fue su experiencia?	¿Cómo evaluaría la rapidez del servicio?
✓ Permitir todas las respuestas posibles	¿Cuál es la red social que usa con mayor frecuencia?	¿Cuáles son las redes sociales que usa con mayor frecuencia? Puede seleccionar varias respuestas
✓ Frecuencias y períodos deben especificarse claramente	¿Consume café orgánico frecuentemente?	¿Cuál es la frecuencia de consumo de café orgánico? A) Nunca B) 1 vez al año B) 1 vez al mes C) 1 vez a la semana D) Todos los días

Recomendación	Pregunta incorrecta	Pregunta correcta
✓ Si se busca un número (cantidades) solicitarlo como pregunta abierta exceptuando ingresos económicos	Elija la cantidad de hijos qué tiene	¿Cuántos hijos tiene?
✓ Las preguntas se leen suavemente en voz alta	¿Está casado (a) o soltero (a)?	¿Cuál es su estado civil?
Evitar:		
✓ Palabras ambiguas	¿Qué chatarra consumes todos los días?	¿Qué alimentos chatarra consumes todos los días?
✓ Preguntas de doble filo	¿Está satisfecho con el sabor del café y con el precio?	¿Cuál es el nivel de satisfacción con el sabor del café? ¿Cuál es el nivel de satisfacción con el precio del café?
✓ Negaciones	¿No crees que uno de los motivos de consumir café orgánico es por ser bueno para el ambiente?	¿Cuáles son los motivos por los que consumes café orgánico?
✓ Preguntas capciosas	¿Qué cantidad de café debes tomar al día para que tu cuerpo no se envenene?	¿Qué cantidad de café consumes todos los días?
✓ Palabras emocionalmente cargadas	¿Cómo te sientes al saber que millones de animales son sacrificados cruelmente para el consumo de carne?	¿Cuál es tu opinión sobre el consumo de carne?
✓ Nombres de prestigio	¿Qué tan saludable consideras el yogur Chobani?	¿Qué tan saludable consideras el yogur griego?
✓ Tener las opciones "otro" o "algo más" en las respuestas	¿Dónde compras alimentos saludables? A) Mercado B) Supermercado C) En línea D) Otro	¿Dónde compras alimentos saludables? A) Mercado B) Supermercado C) En línea

Nota. Elaboración propia con base en Krosnick (2018a, 2018b) y Taherdoost, (2022).

Una vez desarrollada la escala de calificación, es necesario generar la estructura y las secciones del cuestionario para proceder a la evaluación de las propiedades psicométricas. Este suele estructurarse en tres secciones: una administrativa, en la que se incluyen las instrucciones de aplicación, información de distribución del cuestionario o entorno de aplicación y no suele incluirse en el

cuestionario, la segunda tiene que ver con el orden de las preguntas y la última con datos sociodemográficos (Dalati & Marx Gómez, 2018). Es relevante considerar el orden de las preguntas, apesar de que este no afecta el significado de los cuestionamientos, si el proceso cognitivo de quienes responden, por lo que en la tabla 3 se presentan recomendaciones para su ordenamiento (Taherdoost, 2022).

Tabla 1 Recomendaciones para redactar ítems

Sugerencias	
✓	Colocar preguntas fáciles, importantes e interesantes al inicio (primero relacionadas con información básica, después clasificación y finalmente identificación)
✓	Agrupar preguntas relacionadas con la misma temática (de manera serial, semántica, de general a específicas)
✓	Iniciar con preguntas de opinión de los participantes
✓	Colocar preguntas de lo específico a lo general sino existe una opinión claramente expresada por los participantes o a falta de un marco de referencia sobre el tema
✓	Acomodar las preguntas sensibles al final
✓	Generar un flujo natural de las preguntas

Nota. Elaboración propia con base en (Taherdoost, 2022).

¿Qué es la validez de un instrumento?

La validez explica qué tan correctamente la información fue recolectada, verifica que los datos cumplan con el objetivo de investigación y que reflejen con precisión el **constructo** (s) a medir. En otras palabras, asegura que un instrumento, como el cuestionario, tenga la capacidad de medir lo que pretende medir (Phillips et al., 2021; Taherdoost, 2016). Resultando una estrategia de análisis preliminar antes de su empleo. Existen distintos tipos de validación, en este documento se describirán cuatro.

La de caso único es definida como el análisis más simple, se aplica a una persona que cumpla con características semejantes a las de la población de estudio, durante este proceso se van respondiendo las preguntas y se retroalimenta sobre la extensión, claridad y cobertura del cuestionario (Carrion et al., 2015).

Otro tipo, es la validez de contenido, la cual tiene como objetivo evaluar el contenido del instrumento por un comité de expertos, que cuenten con trayectoria y reconocimiento en el tema para que sean capaces de analizar los ítems del instrumento, proporcionar información, juicios y valoraciones certeros. Además, que hagan sugerencias de redacción y de contenido. Se suelen utilizar

cuatro categorías para realizar esta evaluación: claridad, coherencia, relevancia y suficiencia (Galicia Alarcón et al., 2017). Algunos de los métodos para analizar este tipo de validez son: análisis factorial de Tucker, Índice de Validez de Lawshe, Índice de Congruencia de Ítem Objetivo de Rovinelli y Hambleton, V de Aiken, entre otros.

La validez de criterio o validez concreta se refiere al nivel en que una medida se asocia con un resultado, evalúa que tanto una medida predice el resultado para otra medida. Por lo que este tipo de validez puede usarse para predecir el rendimiento o comportamiento pasado, presente o futuro (Taherdoost, 2016). Siendo útil cuando se desean hacer inferencias a partir de puntajes respecto a otras variables de interés. Existen dos tipos: **predictiva** y **concurrente**. La primera predice alguna medida del criterio que se va a realizar a futuro con un diseño **prospectivo** (análisis con el fin de explorar o de predecir el futuro), la segunda relaciona las puntuaciones de la prueba con alguna medida del criterio tomada en el mismo momento, esta implica un diseño **transeccional** o **transversal** (que recolecta datos en un único momento en el tiempo) (Argibay, 2006).

La validez de constructo implica que tan efectivamente se ha convertido un constructo en una realidad práctica y útil. Tiene dos elementos: **validez convergente** (en qué nivel la variable latente se distingue de otras) y **validez discriminante** (prueba que dos medidas de constructos que teóricamente deberían estar relacionados lo estén) (Taherdoost, 2016). Para comprobar la validez convergente y discriminante se realiza

un Análisis Factorial Exploratorio (AFE) el cual analiza las intercorrelaciones de un conjunto de datos, permite establecer agrupaciones de ítems correlacionados entre sí que remiten a factores subyacentes no observables y que sirven para medir la validez del **constructo(s)**. Así, permite no sólo evaluar la validez del instrumento, sino también la forma en la que está construido (Argibay, 2006).

¿Qué es la fiabilidad de un instrumento?

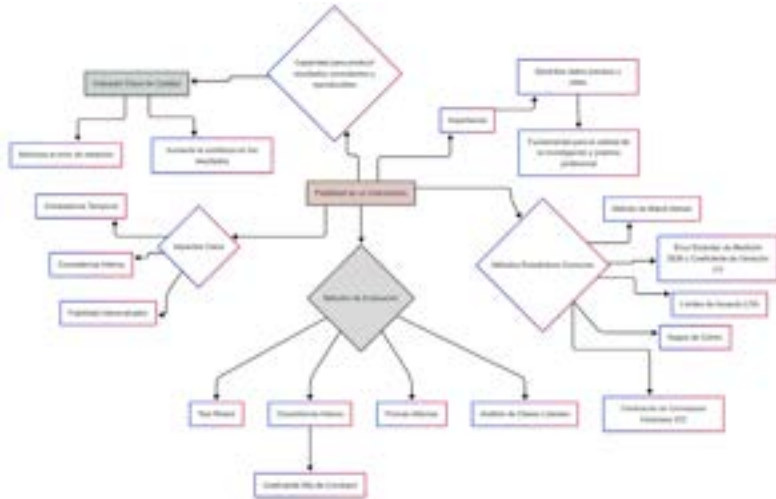
La **fiabilidad** de un instrumento se define como su capacidad para producir resultados consistentes y reproducibles a lo largo del tiempo y bajo distintas condiciones. Es un indicador fundamental de la calidad de un instrumento de medición, trabajando en conjunto con la validez, que asegura que el instrumento mide lo que realmente se propone medir (Kimberlin & Winterstein, 2008; Scholtes et al., 2011; Souza et al., 2017). Es crucial para asegurar que los datos obtenidos sean precisos y útiles tanto para la investigación como para la toma de decisiones. Un instrumento fiable minimiza el error de medición y aumenta la confianza en los resultados obtenidos (Kimberlin & Winterstein, 2008; Scholtes et al., 2011; Souza et al., 2017). En resumen, garantizar la fiabilidad de un instrumento es esencial para la consistencia y precisión de las mediciones, lo que a su vez permite que los resultados sean reproducibles y confiables, elementos fundamentales para la calidad de la investigación y la práctica profesional.

La fiabilidad abarca varios aspectos cruciales. La **consistencia temporal** evalúa la estabilidad de las medidas a lo largo del tiempo, garantizando que los resultados sean uniformes en diferentes momentos. Por otro lado, la **consistencia interna** se refiere a la coherencia de los resultados dentro del mismo instrumento, examinando si sus diferentes partes miden de manera uniforme. Finalmente, la **fiabilidad interevaluador** mide la consistencia de los resultados cuando distintos evaluadores utilizan el mismo instrumento, asegurando que las variaciones no se deban a diferencias entre quienes evalúan (Kimberlin & Winterstein, 2008; Olayinka & Abideen, 2023). Para evaluar la fiabilidad, se utilizan diversos métodos. El **Test-Retest** examina la estabilidad de los

resultados aplicando el mismo instrumento en dos momentos diferentes. La **consistencia interna** se evalúa comúnmente con el coeficiente alfa de Cronbach, que mide la correlación entre los distintos ítems del instrumento. Las **formas alternas** comparan los resultados de diferentes versiones de un mismo instrumento para asegurar su equivalencia. Un método más moderno es el **Análisis de Clases Latentes**, que evalúa la fiabilidad identificando patrones de respuesta consistentes en los datos (Olayinka & Abideen, 2023; Tourangeau et al., 2020; Yusup, 2018).

Existen varios métodos estadísticos para cuantificar la fiabilidad. El **Coefficiente de Correlación Intraclassa (ICC)** es muy utilizado para evaluar la fiabilidad de instrumentos que miden variables continuas, midiendo la consistencia o acuerdo entre diferentes mediciones. El **Método de Bland-Altman** es popular para evaluar el acuerdo entre dos mediciones, permitiendo una visualización gráfica de las diferencias e identificando la **heterocedasticidad** (la varianza de los errores no es igual para todas las variables). El **Error Estándar de Medición (SEM)** y el **Coefficiente de Variación (CV)** se emplean para describir la “fiabilidad absoluta” y son adecuados para comparar la fiabilidad entre distintas herramientas de medición, ayudando a predecir el cambio “real” en las mediciones. Para escalas categóricas, la prueba Kappa de Cohen mide el grado de acuerdo entre evaluadores más allá del azar. Finalmente, los **Límites de Acuerdo (LOA)** proporcionan un rango dentro del cual se espera que caigan la mayoría de las diferencias entre mediciones repetidas, siendo útiles en estudios de comparación de métodos (Atkinson & Nevill, 1998; Park et al., 2018; Raykov & Marcoulides, 2015; Sainani, 2017; Zaki et al., 2012).

Figura 3 Fiabilidad de un instrumento para recolección de datos y métodos de evaluación



Nota. Elaboración propia con base en (Atkinson & Nevill, 1998; Park et al., 2018; Raykov & Marcoulides, 2015; Sainani, 2017; Zaki et al., 2012, 2013)

Relación entre validez y fiabilidad

Siempre debe buscarse que el instrumento de medición, en este caso el cuestionario, mida realmente el constructo (os) determinado y además que proporcione respuestas fiables es decir que sean estables o consistentes (Bolarinwa, 2015). Es importante que el cuestionario sea tanto válido como fiable para que pueda cumplirse con el objetivo de la investigación, esta sea útil, de calidad, permita tomar decisiones adecuadamente y pueda ser comparable en condiciones similares. Las propiedades psicométricas o cualidades (validez y fiabilidad) no son inherentes al instrumento de medición, pueden poseer distintos niveles y están influenciadas por distintos factores, por el constructo (os) que se está midiendo, la población de estudio,

el evaluador e incluso el uso de las puntuaciones generadas del instrumento (Swan et al., 2023). Dichas cualidades al no ser inherentes pueden presentarse una o la otra. Por ejemplo, un termómetro que siempre mide 2°C menos de lo real es fiable pero no válido. Por otro lado, un instrumento puede ser válido, pero no fiable (mide lo correcto, pero con errores inconsistentes) como una escala psicométrica de ansiedad bien diseñada que de resultados muy diferentes al aplicarse dos veces seguidas. Lo ideal es que el instrumento sea válido y fiable, es decir que el termómetro muestre la temperatura correcta (válido) y de consistentemente la misma lectura (fiable) cada vez que sea usado en situaciones comparables (Bourke, 2016; Taherdoost, 2016).

Tabla 2 Recomendaciones y ejemplos para redactar preguntas

Tipo/método	Consejos
Análisis de contenido (validez)	✓ Definir las dimensiones y variables que se pretenden medir, evitar que el instrumento sea diverso y con múltiples dimensiones. ✓ Ser claro en los criterios a evaluar, así como la escala de calificación a emplear. ✓ La extensión de los instrumentos debe ser breve. ✓ Considerar las cargas laborales de los expertos evaluadores, proponer un lapso pertinente para evaluar el instrumento. ✓ Proporcionar plantillas intuitivas y fáciles de responder para agilizar el proceso de recolección de información.
De criterio (validez)	✓ Es fundamental relacionar las puntuaciones del instrumento con el criterio. - Identificar el tipo de validez (concurrente o predictiva) a emplear
De constructo (validez)	✓ Dado que el tamaño de la muestra y el número de ítems influyen en la estabilidad de la estructura factorial, la cantidad de individuos debe ser de al menos cinco por cada ítem del instrumento.
Alfa de Cronbach (fiabilidad)	✓ Este coeficiente es afectado por el número de ítems, al incrementarlos la varianza aumenta. ✓ A mayor número de individuos (muestra) que completen la escala, mayor será la varianza esperada.
Coefficiente Kappa de Cohen (fiabilidad)	✓ Para ejecutar esta prueba, es necesario cumplir las siguientes cinco suposiciones: 1) la(s) variable(s) deben ser medidas categóricamente y ser mutuamente excluyentes, 2) las observaciones deben ser pareadas, 3) cada variable debe contar con los mismos valores de respuesta y la tabulación cruzada debe ser simétrica, 4) los dos codificadores encargados de hacer juicios son independientes para evitar cualquier sesgo, 5) el número de codificadores que hacen juicio sube a dos

Nota. Elaboración propia con base en (Argibay, 2006; Galicia Alarcón et al., 2017; Goyanes, 2024; Oviedo & Campo-Arias, 2005).

¿Cómo mejorar y evaluar las propiedades psicométricas?

Existen distintos factores que influyen en la validez y fiabilidad de un instrumento, por lo que en la tabla 4 se presentan una serie de recomendaciones para su mejora, que faciliten el proceso de análisis y por ende la calidad del cuestionario que ha sido diseñado.

Para evaluar la validez y fiabilidad de un cuestionario, se pueden utilizar diversos programas y

entornos estadísticos. Entre los más utilizados se encuentran R, Python, JASP y JAMOVI, además de hojas de cálculo especializadas y software como SPSS y WINSTEPS. En la tabla 5 se presenta un análisis del software y herramientas, así como su acceso para reconocer las principales opciones que existen para la evaluación de las propiedades psicométricas de un cuestionario.

Tabla 5 Softwares y herramientas para análisis de validez y fiabilidad

Software/ Herramienta	Características Principales	Análisis de Validez	Análisis de Fiabilidad	Características Específicas	Acceso
SPSS	Fácil de usar, manejo de datos faltantes, efectos aleatorios	Modelos mixtos, validez de constructo, efectos fijos y aleatorios, análisis de covarianza	ICC, alfa de Cronbach integrados, análisis de fiabilidad con datos incompletos	Instrucciones específicas disponibles, flexibilidad en diseños complejos	X De pago
AMOS (SPSS)	Ideal para análisis factorial confirmatorio	Análisis factorial confirmatorio avanzado	Índices de fiabilidad del modelo	Modelado de ecuaciones estructurales especializado	X De pago
WINSTEPS	Análisis psicométrico avanzado basado en Rasch	Validez de constructo (Rasch), validez de contenido, análisis de funcionamiento diferencial	Índices de separación, coeficientes de fiabilidad del modelo, fiabilidad de personas e ítems	Modelo de Rasch especializado, mapas de Wright, análisis de ajuste de ítems	X De pago
R (psych, lavaan, irr)	Poderoso, paquetes especializados para psicometría	Pruebas psicométricas avanzadas, validez de contenido, validez de criterio, validez de constructo	Alfa, ICC, consistencia interna, pruebas de estabilidad, equivalencia	Paquetes especializados, análisis psicométricos automatizados, flexibilidad metodológica	✓ Gratis
Python (pingouin, factor_analyzer, semopy)	Alternativa gratuita a SPSS, requiere programación	Módulos para análisis psicométrico, validez de contenido, validez de criterio, validez de constructo	Análisis de fiabilidad automatizado, alfa de Cronbach, pruebas de estabilidad, consistencia interna	Paquetes especializados, análisis psicométricos automatizados, flexibilidad metodológica	✓ Gratis
JASP	Interfaz amigable similar a SPSS, pero gratuita	Análisis factorial, correlaciones, validez de contenido, validez de criterio, validez de constructo	Alfa de Cronbach, análisis de consistencia, pruebas de estabilidad, equivalencia	Paquetes especializados, análisis psicométricos automatizados, flexibilidad metodológica	✓ Gratis
Jamovi	Similar a SPSS, permite análisis de fiabilidad	Validez de constructo básica, validez de contenido, validez de criterio	Análisis de fiabilidad integrado, alfa de Cronbach, pruebas de estabilidad, consistencia interna	Paquetes especializados, análisis psicométricos automatizados, flexibilidad metodológica	✓ Gratis
Excel/Google Sheets (plantillas personalizadas)	Accesible, permite transformaciones detalladas	Regresión, análisis de correlación, regresión lineal, correlación de Pearson	Error intra-sujeto, ICC, alfa (manual), correlación intraclass, desviaciones estándar entre sujetos y pruebas, alfa de Cronbach	Transformaciones logarítmicas para variabilidad proporcional, análisis detallado de consistencia, precisión en mediciones repetidas	✓ Gratis

Nota. Elaboración propia con base en (Hopkins, 2015; Souza et al., 2017; Zhou et al., 2017).

Conclusiones

Para garantizar la calidad de una investigación basada en cuestionarios, es indispensable asegurarse de que los datos recopilados no sean erróneos. Resulta vital que el diseño, desarrollo y evaluación de las propiedades psicométricas del instrumento de recolección de información sean adecuados. Un instrumento bien diseñado no solo garantiza datos confiables y precisos, sino que también minimiza el error de medición y aumenta

la confianza en los resultados obtenidos. La **validez** asegura que el instrumento mida lo que realmente debe medir, mientras que la **fiabilidad** garantiza que los resultados sean consistentes y estables a lo largo del tiempo y bajo distintas condiciones. Además, utilizar herramientas y software estadísticos especializados fortalece los resultados, contribuye significativamente en la mejora de la investigación y en la toma de decisiones.

Conflicto de intereses

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún conflicto de interés.

Declaración de privacidad

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Descargo de Responsabilidad (INTELIGENCIA ARTIFICIAL). Los autores declaran por la presente que NO se han utilizado tecnologías de IA generativa, tales como modelos de lenguaje grandes (ChatGPT, COPILOT, etc.) y generadores de texto a imagen, durante la redacción o edición de este manuscrito.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) el financiamiento para los estudios de posgrado de los estudiantes José Muñoz Flores, Fatima Andrea Bonilla Ramos y Jazmin Zaragoza Alonso

Referencias

- Argibay, J. C. (2006). Técnicas psicométricas. Cuestiones de validez y confiabilidad. Subjetividad y procesos cognitivos, 8, 15-33 (2006). <https://dspace.uces.edu.ar/jspui/handle/123456789/765>
- Atkinson, G., & Nevill, A. (1998). Statistical Methods For Assessing Measurement Error (Reliability) in Variables Relevant to Sports Medicine. Sports Medicine, 26, 217–238. <https://doi.org/10.2165/00007256-199826040-00002>
- Bolarinwa, O. (2015). Principles and methods of validity and reliability testing of questionnaires used in social and health science researches. Nigerian Postgraduate Medical Journal, 22(4), 195. <https://doi.org/10.4103/1117-1936.173959>
- Bourke, Jane. K. Ann. D. Justin. (2016). 7: VALIDITY & RELIABILITY. En SURVEY & QUESTIONNAIRE DESIGN : Collecting Primary Data to Answer Research Questions. <https://www.ebsco.com/terms-of-use>
- Carrion, C., Soler, M., & Aymerich, M. (2015). Análisis de la Validez de Contenido de un Cuestionario de Evaluación del Aprendizaje Basado en Problemas: Un Enfoque Cualitativo. Formación universitaria, 8(1), 13–22. <https://doi.org/10.4067/S0718-50062015000100003>
- Dalati, S., & Marx Gómez, J. (2018). Survey and questionnaires. En Marx Gómez Jorge & Mouselli Sulaiman (Eds.), Modernizing the Academic Teaching and Research (pp. 175–186). Springer, Cham. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-74173-4_10
- DeCastellarnau, A. (2018). A classification of response scale characteristics that affect data quality: a literature review. Quality and Quantity, 52(4), 1523–1559. <https://doi.org/10.1007/s11135-017-0533-4>
- Dueber, D. M., Toland, M. D., Lingat, J. E., Love, A. M. A., Qiu, C., Wu, R., & Brown, A. V. (2022). To Reverse Item Orientation or Not to Reverse Item Orientation, That Is the Question. Assessment, 29(7), 1422–1440. <https://doi.org/10.1177/10731911211017635>
- Elangovan, N., & Sundaravel, E. (2021). Method of preparing a document for survey instrument validation by experts. MethodsX, 8. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2021.101326>
- Galicia Alarcón, L. A., Balderrama Trápaga, J. A., Edel Navarro, R., Galicia Alarcón, L. A., Balderrama Trápaga, J. A., & Edel Navarro, R. (2017). Validez de contenido por juicio de expertos: propuesta de una herramienta virtual. Apertura (Guadalajara, Jal.), 9(2), 42–53. <https://doi.org/10.32870/AP.V9N2.993>
- Goyanes, M. (2024). Análisis de contenido en SPSS y KALPHA: Procedimiento para un Análisis Cuantitativo Fiable con la Kappa de Cohen y el Alpha de Krippendorff. Estud. mensaje period., 30(1), 123–140. <https://doi.org/10.5209/espmp.92732>
- Hopkins, W. G. (2015). Spreadsheets for Analysis of Validity and Reliability. Sportsmedicine, 19, 36+. <https://link.gale.com/apps/doc/A562004416/AONE?u=anon-b9d8c65b&ap>
- Kimberlin, C., & Winterstein, A. (2008). Validity and reliability of measurement instruments used in research. American journal of health-system pharmacy : AJHP : official journal of the American Society of Health-System Pharmacists, 65(23), 2276–2284. <https://doi.org/10.2146/ajhp070364>
- Krosnick, J. A. (2018a). Improving question design to maximize reliability and validity. En The Palgrave Handbook of Survey Research (pp. 95–101). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54395-6_13

- Krosnick, J. A. (2018b). Questionnaire design. En *The Palgrave Handbook of Survey Research* (pp. 439–455). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54395-6_53
- Olayinka, S., & Abideen, T. (2023). Reliability of research instruments in management sciences research: an explanatory perspective. *Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series*, 166, 46. <https://doi.org/10.29119/1641-3466.2022.166.46>
- Oviedo, H. C., & Campo-Arias, A. (2005). Aproximación al uso del coeficiente alfa de Cronbach. *Revista Colombiana de Psiquiatría*, 34(4), 572–580. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-74502005000400009&lng=en&nrm=iso&tng=es
- Park, M., Kang, K., Jang, S., Lee, J., & Chang, S. (2018). Evaluating test-retest reliability in patient-reported outcome measures for older people: A systematic review. *International journal of nursing studies*, 79, 58–69. <https://doi.org/10.1016/j.ijnurstu.2017.11.003>
- Phillips, S. M., Summerbell, C., Hobbs, M., Hesketh, K. R., Saxena, S., Muir, C., & Hillier-Brown, F. C. (2021). A systematic review of the validity, reliability, and feasibility of measurement tools used to assess the physical activity and sedentary behaviour of pre-school aged children. En *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity* (Vol. 18, Número 1). BioMed Central Ltd. <https://doi.org/10.1186/s12966-021-01132-9>
- Raykov, T., & Marcoulides, G. (2015). Scale Reliability Evaluation With Heterogeneous Populations. *Educational and Psychological Measurement*, 75, 875–892. <https://doi.org/10.1177/0013164414558587>
- Robinson, M. A. (2018). Using multi-item psychometric scales for research and practice in human resource management. *Human Resource Management*, 57(3), 739–750. <https://doi.org/10.1002/hrm.21852>
- Sainani, K. (2017). Reliability Statistics. *PM&R*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2017.05.001>
- Scholtes, V. A., Terwee, C. B., & Poolman, R. W. (2011). What makes a measurement instrument valid and reliable? *Injury*, 42(3), 236–240. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2010.11.042>
- Souza, A., Alexandre, N., & Guirardello, E. (2017). Psychometric properties in instruments evaluation of reliability and validity. *Epidemiologia e serviços de saúde : revista do Sistema Unico de Saude do Brasil*, 26(3), 649–659. <https://doi.org/10.5123/S1679-49742017000300022>
- Swan, K., Speyer, R., Scharitzer, M., Farneti, D., Brown, T., Woisard, V., & Cordier, R. (2023). Measuring what matters in healthcare: a practical guide to psychometric principles and instrument development. En *Frontiers in Psychology* (Vol. 14). Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1225850>
- Taherdoost, H. (2016). Validity and Reliability of the Research Instrument; How to Test the Validation of a Questionnaire/Survey in a Research. En *International Journal of Academic Research in Management (IJARM)* (Vol. 5, Número 3). <https://hal.science/hal-02546799v1>
- Taherdoost, H. (2022). Designing a Questionnaire for a Research Paper: A Comprehensive Guide to Design and Develop an Effective Questionnaire Hamed Taherdoost. *Designing a Questionnaire for a Research Paper: A Comprehensive Guide to Design and Develop an Effective Questionnaire Designing a Questionnaire for a Research Paper: A Comprehensive Guide to Design and Develop an Effective Questionnaire*. *Asian Journal of Managerial Science*, 11(1), 8–16. <https://doi.org/10.51983/ajms-2022.11.1.3087i>
- Tourangeau, R., Sun, H., & Yan, T. (2020). Comparing Methods for Assessing Reliability. *Journal of Survey Statistics and Methodology*, 9(4), 651–673. <https://doi.org/10.1093/issam/smaa018>

- Yusoff, M. S. B., Arifin, W. N., & Hadie, S. N. H. (2021). ABC of questionnaire development and validation for survey research. En *Education in Medicine Journal* (Vol. 13, Número 1, pp. 97–108). Penerbit Universiti Sains Malaysia. <https://doi.org/10.21315/EIMJ2021.13.1.10>
- Yusup, F. (2018). Uji Validitas dan Reliabilitas Instrumen Penelitian Kuantitatif. *Jurnal Tarbiyah : Jurnal Ilmiah Kependidikan*, 7(1). <https://doi.org/10.18592/TARBIYAH.V7I1.2100>
- Zaki, R., Bulgiba, A., Ismail, R., & Ismail, N. (2012). Statistical Methods Used to Test for Agreement of Medical Instruments Measuring Continuous Variables in Method Comparison Studies: A Systematic Review. *PLoS ONE*, 7. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0037908>
- Zaki, R., Bulgiba, A., Nordin, N., & Ismail, N. (2013). A Systematic Review of Statistical Methods Used to Test for Reliability of Medical Instruments Measuring Continuous Variables. *Iranian Journal of Basic Medical Sciences*, 16, 803–807. <https://doi.org/10.22038/IJBMS.2013.998>
- Zhou, L., Almutairi, A., Alsaid, N., Warholak, T., & Cooley, J. (2017). Establishing the Validity and Reliability Evidence of Preceptor Assessment of Student Tool. *American Journal of Pharmaceutical Education*, 81. <https://doi.org/10.5688/ajpe5908>

Recepción: 9.12.2025

Revisión: 12.12.2025

Publicación: 08.05.2026

<https://orcid.org/0000-0002-5119-5501>

<https://orcid.org/0000-0003-4152-0953>

<https://orcid.org/0000-0002-4745-5868>

<https://orcid.org/0000-0002-0752-6713>

<https://orcid.org/0000-0003-0525-6155>

PLANTAS: UNA ALTERNATIVA PARA INHIBIR LA CORROSIÓN DEL ACERO AL CARBONO

PLANTS: AN ALTERNATIVE TO INHIBIT CORROSION OF CARBON STEEL

Giselle Gómez-Sánchez¹,
Natalya Victorovna Likhanova²,
Janette Arriola-Morales¹,
Maribel Castillo-Morales¹,
Octavio Olivares-Xometl^{1*}

(¹) Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ingeniería
Química, Puebla, Puebla 72570, México.

(²) Dirección de Investigación, Instituto Mexicano del Petróleo, CDMX
07730, México.

Correos

giselle.gomez@alumno.buap.mx

nvictoro@imp.mx

janette.arriola@correo.buap.mx

maribel.castillo@correo.buap.mx

octavio.olivaresx@correo.buap.mx

Resumen

Por décadas, la industria ha sido un elemento fundamental en la consolidación de la mayoría de las economías a nivel mundial. La creciente demanda de bienes específicos para satisfacer las necesidades del ser humano ha traído una sobreexplotación de recursos naturales y, en muchos de los casos, daños importantes al medio ambiente. Por ello, en este sentido, la industria ha sido señalada como la mayor fuente de contaminación del aire, del agua, del suelo y del subsuelo. Esta contaminación, que en numerosas ocasiones es excesiva para el suelo y los mantos acuíferos, se origina por el uso de compuestos químicos, en su mayoría tóxicos. En la industria del petróleo, el uso de compuestos químicos es una práctica común para el control de la corrosión de aleaciones de acero expuestas a medios acuosos corrosivos, para prolongar su tiempo de vida útil. Estos compuestos químicos se conocen como inhibidores de corrosión (IC). Lamentablemente, las recientes normativas medioambientales han dirigido la investigación hacia el análisis de una nueva categoría de IC conocida como “compuestos verdes”, en la que los extractos vegetales están desempeñando un rol destacado en la producción de IC respetuosos con el entorno. Además de mostrar excelentes propiedades de protección en aleaciones que se encuentran en contacto con medios corrosivos propios de la industria.

Palabras clave: *Extracto de plantas; Corrosión; Acero al carbono; Inhibidor de corrosión.*

Abstract

For decades, industry has been a fundamental element in consolidating most of the world's economies. The growing demand for specific goods to meet human needs has led to the overexploitation of natural resources and, in many cases, significant damage to the environment. For these reasons, the industry has been identified as the largest source of pollution of air, water, soil, and subsoil. This pollution, which in many cases is excessive for the soil and aquifers, is due to the use of mostly toxic chemical substances. In the petroleum industry, the use of chemical compounds is a common practice for controlling the corrosion of steel alloys exposed to corrosive aqueous media, in order to prolong their useful life. These chemical compounds are called corrosion inhibitors (CIs). Fortunately, current environmental legislation has directed research towards the study of a new class of CI called “green compounds,” in which plant extracts are playing a prominent role in obtaining environmentally friendly CI. In addition to exhibiting excellent protective properties in alloys that come into contact with corrosive media typical of the industry.

Keywords: *Plant extracts, Corrosion, Carbon steel, Corrosion inhibitors*

Generalidades de los metales

Desde el comienzo de la historia, los humanos han utilizado metales para facilitar el avance y progreso tecnológico, definiendo etapas con el nombre de estos metales como Edad de Bronce y Edad de Hierro. Esto facilitó la amplia comprensión de los materiales y transformó la sociedad al fomentar hallazgos e innovaciones en la creación de nuevos materiales, uno de los pilares fundamentales de las tecnologías contemporáneas (Figura 1).



Figura 1. Línea del tiempo de los principales metales industriales (autoría propia).

En la actualidad, los metales continúan siendo esenciales en casi todas las facetas de la vida humana. En el sector de la construcción y la industria, las aleaciones de acero resultan esenciales para construir estructuras resistentes y duraderas. Por otro lado, en el sector del transporte, metales como el aluminio resultan fundamentales para la construcción de partes de vehículos, satélites, aviones, etc., debido a su ligereza, seguridad y resistencia al ambiente. En el campo de la tecnología y la innovación en la electrónica, el cobre, oro, platino, indio, galio y otros metales son cruciales gracias a su magnífica conductividad eléctrica y térmica. En el campo de la medicina y la salud, metales como el titanio, acero inoxidable y aleaciones de cobalto-cromo son elegidos por su biocompatibilidad, resistencia y su capacidad para resistir la corrosión. Actualmente, los metales constituyen el eje central de numerosos desarrollos tecnológicos gracias a su adaptabilidad y propiedades mecánicas.

De manera específica, el valor de los metales, en las diferentes áreas, radica en sus características singulares, tales como resistencia, ductilidad, conductividad eléctrica y térmica, y la habilidad para ser reciclados. Estas particularidades los convierten en esenciales para el progreso de la sociedad moderna (Capasso et al., 2024).

Los metales y su entorno

Los metales, antes de tener un valor agregado, se encuentran en la naturaleza, la mayoría en forma de óxidos que en su conjunto forman minerales. Esto significa que cuando un metal se encuentra en la naturaleza, el entorno desencadena un proceso inevitable comúnmente llamado corrosión. El resultado final es la formación de diversos minerales existentes, cuyo proceso de formación se encuentra ligado a reacciones de oxidación (R. Holla et al., 2024). Para ello, es importante comprender que, para obtener una aleación metálica, es necesario primero extraerla de la naturaleza en forma de óxidos complejos; posteriormente, con diferentes procesos metalúrgicos se obtiene una aleación metálica con propiedades únicas para su uso.



Figura 2. Ciclo productivo del acero (autoría propia).

El ciclo de vida de un material metálico siempre dependerá del progreso de las reacciones electroquímicas, es decir, tiende a volver a su estado inicial a través del proceso de corrosión (Figura 2). La definición más sencilla del fenómeno de la corrosión establece una interacción interfacial irreversible y dependiente del medio ambiente que conduce a la disolución del metal, obedeciendo el principio fundamental de la termodinámica (Vargel, 2004).

Desde el punto de vista industrial, se resaltan tres pilares fundamentales para investigar la corrosión de aleaciones metálicas (Figura 3): seguridad, economía y medio ambiente. El deterioro en estas aleaciones causado por la corrosión puede provocar malas condiciones de funcionamiento en los procesos de produc-

ción, originando pérdidas económicas (mantenimiento, reemplazo del material corroído, servicios especializados, etc.). Así como condiciones inseguras que pueden conducir a la pérdida de vidas y efectos negativos al medio ambiente, afectando la vida de ecosistemas completos (Heidersbach, 2011). Para tener una idea clara del impacto de los daños por corrosión en la economía de países industrializados, sus pérdidas económicas representan en promedio un 2.5 a 3.5% del PIB (producto interno bruto). Debido a ello, el sector industrial y organismos internacionales como la Organización Mundial contra la Corrosión (por sus siglas en inglés, WCO), trabajan arduamente para implementar sistemas adecuados de control y gestión de la corrosión con el objetivo de reducir su impacto a nivel mundial (Heidersbach, 2011).



Figura 3. Tres ejes importantes de inhibir la corrosión (autoría propia).

Las plantas como fuentes de compuestos químicos

Para el control de la corrosión por medios acuosos la práctica más económica y sencilla en la industria es el uso de IC. Estos son compuestos químicos orgánicos e inorgánicos que pueden resultar costosos y dañinos para los organismos vivos debido a su elevada toxicidad (Abdullah Dar, 2011). Sus residuos pueden infiltrarse en el suelo hasta llegar a los cuerpos de agua, dañando especies marinas susceptibles a sus componentes. En el ser humano pueden provocar enfermedades en riñones e hígado, además de alterar procesos bioquímicos y el funcionamiento de las enzimas (Abdallah et al., 2010). Debido a los riesgos para el medio ambiente y la salud humana; se ha intensificado la creciente demanda de buscar alternativas de ICs que sean ecológicos o amigables con el medio ambiente. Actualmente, se ha establecido que un IC puede ser considerado verde cuando es biodegradable, no bioacumulativo y

con un nivel de toxicidad marina nulo o muy bajo (Umoren et al., 2019). Esta reciente tendencia de ICs verdes promueve un compromiso consciente en prácticas industriales cada vez más responsables y sostenibles, donde coexista un balance entre la alta eficiencia en el control de la corrosión, un menor impacto ambiental, consideraciones de seguridad y aspectos económicos implícitos. Las alternativas basadas en extractos de plantas han ganado popularidad gracias a su amplia variedad y gama de compuestos activos orgánicos que poseen propiedades destacables como biodegradabilidad, biodisponibilidad, sostenibilidad y no toxicidad. Al igual que muchos seres vivos, las plantas cuentan con un conjunto de órganos que permiten su adecuado funcionamiento. Una planta está constituida, principalmente, por dos partes: aérea (tallo, hoja, flor y fruto) y subterránea (raíces) (Figura 4).

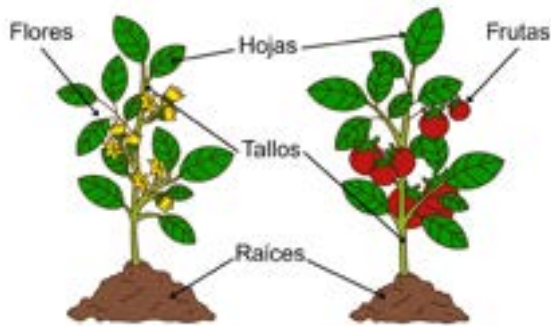


Figura 4. Partes de una planta (Autoría propia).

El tallo soporta el segmento aéreo de la planta, une las hojas con las raíces, siendo estas últimas las que se adhieren al terreno, absorben agua y minerales, además de tener la capacidad de conservar ciertos nutrientes. Las hojas son el sitio central de la fotosíntesis, al capturar la energía de la luz solar para obtener materiales orgánicos. Mientras que los órganos reproductores son tanto las flores como los frutos, donde el primero atrae a los polinizadores y el segundo, a los propagadores de semillas.

Debido a la riqueza nutritiva de las diversas partes de las plantas, se pueden obtener extractos de cada una de estas. Estos son considerados como un concentrado de compuestos activos proveniente de frutos, flores, semillas, cáscaras, hojas, corteza, tallo, y savia o raíces. Un extracto puede contener una gran variedad de fitoquímicos que, según su estructura química, pueden dividirse en varios grupos: glucósidos, alcaloides, polifenoles, flavonoides, no- flavo-

noides, polisacáridos, lectinas, saponinas, terpenoides, esteroides, etc. (Raja & Sethuraman, 2008; Zhang et al., 2023). Estos fitoquímicos presentes en los extractos de plantas resultan de gran interés porque contienen heteroátomos como nitrógeno, azufre, y oxígeno, así como anillos aromáticos y grupos pendientes, a través de los cuales, se puede llevar cabo el proceso de adsorción en la superficie del metal, lo que permite inhibir la corrosión. Estudios realizados han demostrado que ICs con fitoquímicos, pueden reducir hasta en un 30% el costo de las pérdidas por corrosión, en comparación con los inhibidores obtenidos de manera sintética

(Malik et al., 2024), siendo esta una opción económica viable debido a su disponibilidad y manejo más sencillo. Para obtener estos fitoquímicos se recurre a la extracción con solventes, donde el material vegetal se humedece en agua, etanol o metanol durante un periodo de tiempo, obteniendo compuestos activos de la planta en forma de extracto; posteriormente, son separados por métodos físicos, ya sea por filtración o centrifugación. Entre los métodos más utilizados para obtener el extracto de una planta se encuentran maceración, extracción tipo Soxhlet, extracción asistida por microondas o ultrasónicos (Zhang et al., 2023).

Los compuestos químicos de las plantas y sus usos como ICs

Los ICs obtenidos a partir de plantas, en su mayoría provienen de extractos de hojas, seguidos de cáscaras, raíces, frutos e incluso la planta completa. Así como de semillas, umbelas y en algunos casos algas. Esta gran diversidad en las propiedades de las plantas ha permitido una amplia gama de estudios de ICs para aleaciones de acero en medios corrosivos. La preferencia por hojas, está argumentada porque son las principales capturadoras de luz y responsables de la respiración, transpiración y función clorofílica. A través de ellas circula una cantidad importante de fitoquímicos disponibles. Con este argumento se estudió el extracto de hojas de *Morus alba Pendula* (morera péndula). La razón de la selección de esta especie fue debido a su contenido de compuestos activos (poli)fenólicos como ácido cafeico, ácidos cafeoilquínicos, kaempferol-3-O-(6-malonil)-glucósido, quercetin-3-O-(6-malonil)-glucósido, quercetin-3-O-glucósido, ácido clorogénico y flavonoles, compuestos claves en el procesos de protección del acero (Jokar et al., 2016). En extractos de hojas de *Trifolium repens* (trébol blanco), los compuestos bioactivos identificados fueron ácidos orgánicos, cumarinas, oligosacáridos, aminoácidos, péptidos, lavonas, lavonoides, flavones y flavonoides, cuyo efecto inhibidor fue atribuido a la presencia de estos fitoquímicos (Banumathi et al., 2024). Siguiendo esta línea de investigación, se estudió cómo IC

al extracto etílico de las hojas de *Tabebuia heterophylla* (roble blanco), donde los autores asociaron el efecto inhibidor del extracto a la presencia del éster etílico del ácido 2-hidroxi-1-(hidroximetil) hexadecanoico (Pai et al., 2024). En un estudio realizado a extractos de hojas de *Phoenix dactylifera* (palmera datilera) se determinó que la actividad antioxidante del extracto se debió a la presencia de ácidos fenólicos, flavonoles, flavonas y sus derivados, los cuales en conjunto actúan como un IC inhibiendo las reacciones de corrosión anódica y catódica (Umoren et al., 2021). [14] El extracto de las hojas del arbusto *Corchorus olitorius* (yute) fue estudiado por Nwoye et al. (Nwoye & Nwigwe, 2023), donde los compuestos activos fueron esteroides, saponinas, flavonoides, taninos, alcaloides y fenoles. Por su parte, Khadom et al. (Khadom et al., 2022) estudiaron extractos de hojas de *Cardaria Draba* (mastuerzo oriental), por su alto contenido de compuestos bioactivos como alcaloides, saponinas, flavonoides, terpenoides, taninos, triterpenoides y leucoantocianinas (Al-Owaidi et al., 2018). Así mismo, el extracto de hojas de *Arbutus unedo L.* (madroño) fue estudiado por Abdelaziz et al. (Abdelaziz et al., 2021), debido a la presencia de quercetina, quercitrina, catequina, ácido clorogénico, derivados elágicos, α -tocopherol, α -terpineol, (E)2-undecenal, ácido linoleico, 2,6-di-tert-butil-p-cresol, acetato de 2-etoxietilol,

nonanal y decanal. Por su parte, Shahini et al. (Shahini et al., 2021) estudiaron el extracto acuoso de las hojas de *Stachys byzantina* (oreja de cordero), esta planta fue de interés por su contenido de compuestos fenólicos (ácido clorogénico, ácido rosmarínico, ácido o-cumárico y ácido gálico), flavonoides (luteolina), flavanol (catequina) y saponinas, principalmente. De igual manera, el extracto metanólico de las hojas de *Murraya koenigii* (árbol del curry) fue seleccionada por su composición de alcaloides de carbazol como mahanimbina, girinimbina, murrayanina y murrayafolina (Pandey et al., 2024). En cambio, Omotioma et al. (Omotioma et al., 2024) estudiaron el extracto etanólico de las hojas de *Ricinus communis* (aceite de ricino) y determinaron que el extracto contenía, principalmente, compuestos activos orgánicos como nicotinato de metilo, éster metílico, piridina-4-carbohidrazida, 4-cetopimélico, ácido 4-oxoheptanodioico, ácido succínico e hidrogenosuccinato de etilo. Mientras que, en un estudio realizado con extracto de *Solanum surattense* (hierba mora de frutos amarillos), los principales compuestos responsables de la protección del acero fueron solanidano, espirosolano y avenacósido (Haldhar et al., 2021). Un aspecto relevante enfatizado es que la presencia y concentración de los fitoquímicos dependen de la estacionalidad y región, siendo una variable importante a considerar debido a la necesidad de analizar los extractos para obtener los compuestos de mayor interés. Con respecto a estudios en cáscaras de frutas como ICs para el acero, existen aportaciones importantes porque esta es rica en fitoquímicos. La cáscara de *Hymenaea stigonocarpa* (jatobá do cerrado en Brasil) ha sido estudiada debido a su actividad antioxidante y contenido notable de flavonoides, compuestos fenólicos, vitamina C, carotenoides y licopenoides (Policarpi & Spinelli, 2020). También se han realizado estudios en cítricos, uno de ellos, es la cáscara de lima dulce por ser catalogada una fuente rica en antioxidantes, vitamina C, flavonoides, pectina y terpenos con excelentes resultados como IC (Sowmyashree et al., 2023), donde se consideró que el compuesto limoneno fue el componente con capacidad inhibidora. En el extracto

de la cáscara de *Punica granatum* (granada) se determinó la presencia de grupos hidroxilo, carbonilo y aromáticos con una cantidad considerable de punicalagina, punicalina, granatina A, granatina B, ácido maleico, ácido ursólico, ácido gálico, entre otros componentes menores. Concluyendo que el ácido gálico y granatina B fueron los centros principales de adsorción debido a la presencia de heteroátomos de oxígeno, anillos aromáticos con electrones π y grupos donadores de electrones (Ashassi-Sorkhabi et al., 2015). De acuerdo con la literatura, algunas plantas de tipo medicinales también han sido categorizadas como potenciales IC; por ejemplo, las hojas de *Salvia miltiorrhiza* (salvia china) son conocidas porque contienen una amplia variedad de compuestos como ácidos fenólicos (salvianólico A, salvianólico B, litospérmico, rosmarínico y R-(+)- β -(3,4-dihidroxifenil) láctico, así como componentes liposolubles (tanshinonas, y criptotanshinona). Para entender la interacción de estas moléculas con el metal, con la ayuda de cálculos teóricos se sugirió que las moléculas poseen sitios de ataque nucleofílicos (anillo fenilo y grupo carbonilo) así como electrofílico (anillo fenilo y enlace C-O, C=O) (Zeng et al., 2024). Otro estudio fue realizado para *Fumaria officinalis* (palomilla) por su importancia como remedio para problemas hepáticos, renales, dermatológicos y purgante. Se consideró como una alternativa atractiva como IC por su variedad de principios activos, que incluyen sales de potasio, ácido fumárico, flavonas, flavonoles, flavanonas, flavan-3-oles, antocianinas, dihidroflavonoles e isoflavonas, derivados glicosilados o acilados y estructuras oligoméricas y poliméricas, etc. (Santos-Buelga & San-Feliciano, 2017). Los resultados indicaron que la concentración del ácido sulfúrico limitó la acción inhibidora del extracto, resultando en una evidente desorción y poca interacción física entre las especies químicas contenidas en el extracto y la superficie del acero (Golchinvaft et al., 2020). Asimismo, Hamri et al. (Hamrahi et al., 2021) estudiaron el extracto de la planta medicinal *Lawsonia inermis* L. o *Lawsonia Alba* (Henna). Este arbusto popular por sus fines dermatológicos y reumáticos, además, de ser utilizado como un polvo que sirve para teñir,

también fue categorizado como IC por contener abundantes fitoconstituyentes de diversas clases, identificándose cuatro compuestos químicos claves: 2-hidroxi-1,4-naftoquinona (Lawsona), ácido gálico, ácido tánico y α -D-glucosa. Confirmando que el fenómeno de inhibición del extracto de Henna se vincula con una barrera física (fisisorción) entre el medio corrosivo y el metal. Por otra parte, las plantas invasoras constituyen un riesgo ecológico, por lo que considerar su aprovechamiento evita su propagación; bajo este criterio el extracto de la especie de maleza invasora *Parthenium hysterophorus* L. (escoba amarga) fue evaluada como IC, por su contenido de flavonoides, fenilpropanoides, alcaloides y aminoácidos. A pesar de no poseer excelentes propiedades como IC, se confirmó que su adsorción al acero ocurre por un fenómeno de fisisorción y quimisorción, impulsadas por estructuras conjugadas y átomos de N y O, que protegieron mediante enlaces de coordinación y retroalimentación (Wu et al., 2025).

Las flores y umbelas de plantas son menos frecuentes en las investigaciones, debido a que consisten en partes temporales de la planta y depende de la estación del año, así como la frecuencia de floración de la planta, generando un menor abasto para los fines propuestos. Sin embargo, han presentado resultados similares a los obtenidos por otras partes de la planta. Un ejemplo es Li et al. (Li et al., 2021), quienes estudiaron el extracto acuoso de las flores de *Brassica oleracea* L. (col silvestre) como IC, identificando heterocíclicos orgánicos como 1-metoxiindol-3-il-metilformamida (MYA), 1-metoxiindol-3-il-acetonitrilo (MY), 4-metoxi-indolina-2,3-diona (MID) y brasicanal C (BC). Las propiedades inhibitorias, se atribuyeron a la formación de una barrera sobre la superficie del acero que propiciaron la disminución del daño al metal. Por otro lado, los frutos y semillas de diversas plantas han sido considerados como potenciales IC, Fekkar et al. (Fekkar et al., 2020) compararon las propiedades inhibitorias de los extractos acuoso y hexanólico de los frutos de *Chamaerops humilis* (palmera enana). De acuerdo con el estudio, el extracto etanólico obtuvo mayores eficiencias en compa-

ración con el extracto hexanoico. Asimismo, el aceite esencial obtenido de las semillas de *Brachychiton rupestris* (árbol botella de hojas estrechas) confirmó excelentes propiedades como IC, por su contenido en ácido linoleico, trilinoleico, oleico, palmítico, dipalmítico, tripalmítico y gadoleico, sugiriendo que estos compuestos forman una película inhibitoria al ser adsorbidos sobre el acero (Aitlaalim et al., 2016). Los cactus también han sido tema de estudio con el propósito de prolongar la vida de las aleaciones ante medios corrosivos. Para ello, el extracto metanólico de las umbelas de *Ammi visnaga* (visnaga) fue tema de estudio, reportándose 46 compuestos en el extracto, donde la mayor composición fue de edulisin III, binapacril, kelling y visnagina. La eficiencia de inhibición fue soportada por interacciones a través de los átomos de oxígeno y anillos aromáticos de los compuestos, siendo asociado principalmente a la edulisin III (Zaher et al., 2022). Mientras que, un grupo de macroalgas marinas rojas (*Eucheuma*) que representan más del 80% de la producción mundial de carragenina, considerada un producto de importancia para la industria cosmética y alimenticia (Pereira & Yarish, 2008), fue estudiado por Nikitasari et al. (Nikitasari et al., 2022), quienes encontraron que el extracto de *Eucheuma* también posee propiedades como IC para el acero en medios ácidos, atribuido a su contenido de polifenoles, los cuales pueden formar complejos con la superficie del metal y disminuir la transferencia de carga entre el metal y el entorno corrosivo ácido. Adicionalmente, otros estudios han evidenciado que las algas de esta especie poseen una alta capacidad antioxidante gracias también a su alto contenido en carotenoides (Balasubramaniam et al., 2020). Finalmente, la Tabla 1 presenta un condensado de las plantas citadas y sus aplicaciones como ICs para diferentes medios corrosivos con sus respectivas eficiencias de inhibición.

Tabla 1. Extractos de plantas como IC para diversos aceros.

Planta	Órgano/ Solvente	Metal/ Medio	Concentración/ Eficiencia de inhibición	Ref.
<i>Morus alba pendula</i> (morera pendular)	Hojas/H ₂ O	Acero al carbono/ 1 M HCl	0.4 g/L: 93%	(Iokar et al., 2016)
<i>Trifolium repens</i> (trébol blanco)	Hojas/H ₂ O	Acero al carbono/ 1 N HCl	1000 ppm + 3 h: 92.1%	(Banumathi et al., 2024)
<i>Tabebuia heterophylla</i> (peral de la martinica)	Hojas/etanol	Acero bajo en carbono/ 1 M HCl	440 ppm: 94.8%	(Pai et al., 2024)
<i>Phoenix dactylifera</i> (palmera datilera)	Hojas/butanol	Acero API X60/ 15 % HCl	200 ppm + 3 mM FA: 96.9%	(Umoren et al., 2021)
<i>Corchorus olitorius</i> (yute)	Hojas	Acero dulce/ 1.5 M KOH	3 g/L: 99.93%	(Nwoye & Nwigwe, 2023)
<i>Cardaria Draba</i> (mastuerzo oriental)	Hojas/1 M HCl	Acero dulce/1 M HCl	5 mL + 1.25 mL KI: 95.5%	(Khadom et al., 2022)
<i>Arbutus unedo</i> L. (madroño)	Hojas/etanol + H ₂ O (70:30 v/v)	Acero dulce/1 M HCl	0.5 g/L: 91.7%	(Abdelaziz et al., 2021)
<i>Stachys byzantina</i> (mish gush u oreja de cordero)	Hojas/H ₂ O	Acero dulce/1 M HCl	1200 ppm + 24 h: 97%	(Shahini et al., 2021)
<i>Murraya koenigii</i> (árbol del curry)	Hojas/metanol	Acero dulce/1 M HCl	1000 ppm + 1 h: 85.7%	(Pandey et al., 2024)
<i>Ricinus communis</i> (planta de aceite de ricino)	Hojas/etanol + H ₂ O	Acero dulce/ 1 M H ₂ SO ₄	0.6 g/L + 318 K: 96.25%	(Omotioma et al., 2024)
<i>Solanum surattense</i> (hierba mora de frutos amarillos)	Partes aéreas/H ₂ O	Acero bajo en carbono/ 0.5 M H ₂ SO ₄	0.5 g/L: 93%	(Haldhar et al., 2021)
<i>Hymenaea stigono- carpa</i> (jatobá do cerrado)	Cáscara/ H ₂ O	Acero dulce/ 0.5 M H ₂ SO ₄	1.223 g/L: 87.2%	(Policarpi & Spinelli, 2020)
<i>Citrus limetta</i> Risso (lima dulce)	Cáscara/ H ₂ O	Acero dulce/ 1 M HCl	400 ppm: 93.64%	(Sowmyashree et al., 2023)
<i>Punica granatum</i> (granada)	Cáscara/Metanol	Acero dulce/1 M HCl	1 % v/v: 99%	(Ashassi-Sorkhabi et al., 2015)
<i>Salvia miltiorrhiza</i> (salvia china)	Raíces/H ₂ O	Acero Q235/1 M HCl	0.2 g/L: 92.8%	(Zeng et al., 2024)
<i>Fumaria officinalis</i> (palomilla)	Completa/etanol	Acero API X80/ 1 M H ₂ SO ₄	6 g/L + 298 K: 88%	(Golchinvafta et al., 2020)
<i>Parthenium hysterophorus</i> L. (escoba amarga)	Completa/ Etanol + H ₂ O	Acero laminado en frío/ 0.50 M H ₂ SO ₄	0.1 g/L + 0.01 g/L: 81.8%	(Wu et al., 2025)
<i>Lawsonia inermis</i> L. (hena)	Completa/H ₂ O + alcohol (4:1 v/v)	Acero API 5L B/ 15 ppm H ₂ S	2.5 g/L: 92%	(Hamrahi et al., 2021)
<i>Brassica oleracea</i> L (col silvestre)	Fruto/H ₂ O	Acero Q235/ 0.5 M H ₂ SO ₄ y 1 M HCl	0.3 g/L: + H ₂ SO ₄ : 92.7% + HCl: 93%	(Li et al., 2021)
<i>Chamaerops humilis</i> L. (palmera enana)	Fruto/Etanol Fruto/ C ₆ H ₆	Acero dulce/1 M HCl	0.125 g/L: + Etanol: 88% + C ₆ H ₆ : 80%	(Fekkar et al., 2020)

Planta	Órgano/ Solvente	Metal/ Medio	Concentración/ Eficiencia de inhibición	Ref.
<i>Brachychiton rupestris</i> (árbol botella de hojas estrechas)	Semillas/C ₆ H ₆	Acero dulce/1 M HCl	1.2 g/L: 91%	(Aitlaalim et al., 2016)
<i>Ammi visnaga</i> (Viznaga)	Umbela/Metanol	Acero al carbono/ 1 M HCl	700 ppm + 303 K: 83%	(Zaher et al., 2022)
<i>Eucheuma seaweed algae</i>	H ₂ O	Acero API 5L/0.1 M HCl	500 ppm: 92%	(Nikitasari et al., 2022)

Perspectivas del uso de las plantas como IC

Es importante resaltar que, si bien los extractos de partes de plantas como potenciales ICs tienen ciertas ventajas en el cuidado al medio ambiente por su biodegradabilidad, renovabilidad y bajo impacto ambiental con respecto a los ICs sintéticos orgánicos e inorgánicos, aún existen preguntas sin resolver acerca de su uso como ICs en aleaciones metálicas; siendo una de ellas; la comprensión del complejo mecanismo de protección en un metal donde están implícitos el/ los componente(s) específico(s) responsable(s)

de la inhibición de la corrosión. Esto asociado a que un extracto de planta contiene múltiples compuestos fitoquímicos potencialmente activos que pueden implicar procesos complejos de adsorción química o física al inhibir la corrosión de un metal. Por ello, a la fecha existe un arduo camino de investigación por recorrer en el uso de extractos de plantas como IC, principalmente en nuestro país donde se estima que se localizan aproximadamente el 70% de variedades de plantas del mundo (Guzman Gallardo, 2025).

Declaración de privacidad

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Los autores se descargan de responsabilidad (INTELIGENCIA ARTIFICIAL) Los autores declaran por la presente que NO se han utilizado tecnologías de IA generativa, tales como modelos de lenguaje grandes (ChatGPT, COPILOT, etc.) y generadores de texto a imagen, durante la redacción o edición de este manuscrito.

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia. Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Los autores se descargan de responsabilidad (INTELIGENCIA ARTIFICIAL) Los autores declaran por la presente que NO se han utilizado tecnologías de IA generativa, tales como modelos de lenguaje grandes (ChatGPT, COPILOT, etc.) y generadores de texto a imagen, durante la redacción o edición de este manuscrito.

Conflicto de interés

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún conflicto de interés. Los autores participantes en la elaboración de este artículo manifestamos no tener ningún conflicto de interés personal o económico.

Agradecimientos

Todos los autores agradecen el apoyo a la VIEP-BUAP por el apoyo otorgado al proyecto ID Proyecto: 00354-PV/2024

Referencias

- Abdallah, M., Radwan, M. A., Shohayeb, S. M., & Abdelhamed, S. (2010). Use of some natural oils as crude pipeline corrosion inhibitors in sodium hydroxide solutions. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 46(5), 354-362. <https://doi.org/10.1007/s10553-010-0234-3>
- Abdelaziz, S., Benamira, M., Messaadia, L., Boughoues, Y., Lahmar, H., & Boudjerda, A. (2021). Green corrosion inhibition of mild steel in HCl medium using leaves extract of *Arbutus unedo* L. plant: An experimental and computational approach. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 619, 126496. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126496>
- Abdullah Dar, M. (2011). A review: plant extracts and oils as corrosion inhibitors in aggressive media. *Industrial Lubrication and Tribology*, 63(4), 227-233. <https://doi.org/10.1108/00368791111140431>
- Atitlaalim, A., Boudalia, M., Ouanji, F., Echihi, S., Guenbour, A., Belleaouchou, A., Tabyaoui, M., Kacimi, M., & Zarrouk, A. (2016). Essential oil of *brachychiton* as eco-friendly green inhibitor for the corrosion control of mild steel in hydrochloric acid medium. *Der Pharma Chemica*, 18, 155-165.
- Al-Owaidi, M., Naser, E., & Abed, S. (2018). *Cardaria drabra* L.: A review of Phytochemistry and Therapeutic Uses. *Plant Archives*, 19.
- Ashassi-Sorkhabi, H., Mirzaee, S., Rostamikia, T., & Bagheri, R. (2015). Pomegranate (*Punica granatum*) Peel Extract as a Green Corrosion Inhibitor for Mild Steel in Hydrochloric Acid Solution. *International Journal of Corrosion*, 2015(1), 197587. <https://doi.org/10.1155/2015/197587>
- Balasubramaniam, V., June Chelyn, L., Vimala, S., Mohd-Fairulnizal, M. N., Brownlee, I. A., & Amin, I. (2020). Carotenoid composition and antioxidant potential of *Eucheuma denticulatum*, *Sargassum polycystum* and *Caulerpa lentillifera*. *Heliyon*, 6(8), e04654. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04654>
- Banumathi, R., Abuthahir, S. S. S., Sheit, H. M. K., Mohan, K. S., Mohandas, T., & Vijaya, K. (2024). Corrosion inhibition potential of aqueous extract of *Trifolium repens* plant leaves on carbon steel in hydrochloric acid medium (TRPL). *Discover Electrochemistry*, 1(1), 13. <https://doi.org/10.1007/s44373-024-00014-6>
- Capasso, I., Andreacola, F. R., & Brando, G. (2024). Additive Manufacturing of Metal Materials for Construction Engineering: An Overview on Technologies and Applications. *Metals*, 14(9). <https://doi.org/10.3390/met14091033>
- Fekkar, G., Yousfi, F., Elmsellem, H., Aiboudi, M., Mohammed, R., Abdel-Rahman, I., Hammouti, B., & Bouyazza, L. (2020). Eco-friendly *Chamaerops humilis* L. fruit extract corrosion inhibitor for mild steel in 1 M HCl. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 9, 446-459. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2020-9-2-4>
- Golchinvafa, A., Mousavi Anijdan, S. H., Sabzi, M., & Sadeghi, M. (2020). The effect of natural inhibitor concentration of *Fumaria officinalis* and temperature on corrosion protection mechanism in API X80 pipeline steel in 1 M H2SO4 solution. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 188, 104241. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2020.104241>
- Guzman Gallardo, F. L. (2025). Biocultural understanding of medicinal plants in Mexico. *Mexican Journal of Medical Research ICSA*, 13(25), 81-85. <https://doi.org/10.29057/mjmr.v13i25.12390>
- Haldhar, R., Prasad, D., Bahadur, I., Dagdag, O., Kaya,

- S., Verma, D. K., & Kim, S.-C. (2021). Investigation of plant waste as a renewable biomass source to develop efficient, economical and eco-friendly corrosion inhibitor. *Journal of Molecular Liquids*, 335, 116184. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116184>
- Hamrahi, B., Khanlarkhani, A., Madani, S. M., Fattah-alhosseini, A., & Gashti, S. O. (2021). Evaluation of Henna Extract Performance on Corrosion Inhibition of API 5L Steel in H₂S-Containing Medium and DFT Quantum Computing of Its Constituents. *Metals and Materials International*, 27(11), 4463-4476. <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00736-3>
- Heidersbach, R. (2011). *Metallurgy and Corrosion Control in Oil and Gas Production* (1 ed.). John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9780470925782>
- Jokar, M., Farahani, T. S., & Ramezanzadeh, B. (2016). Electrochemical and surface characterizations of morus alba pendula leaves extract (MAPLE) as a green corrosion inhibitor for steel in 1M HCl. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 63, 436-452. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.02.027>
- Khadom, A. A., Abd, A. N., & Ahmed, N. A. (2022). Synergistic effect of iodide ions on the corrosion inhibition of mild steel in 1 M HCl by Cardaria Draba leaf extract. *Results in Chemistry*, 4, 100668. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2022.100668>
- Li, H., Qiang, Y., Zhao, W., & Zhang, S. (2021). A green Brassica oleracea L extract as a novel corrosion inhibitor for Q235 steel in two typical acid media. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 616, 126077. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.126077>
- Malik, B., Kaur, M., Singh, K., Kaur, J., Saxena, A., Sohal, H. S., Husain, F. M., Arshad, M., & Adil, M. (2024). An environmentally sustainable approach for the utilization of Erigeron bonariensis as a green inhibitor against weathering steel corrosion in acidic media. *RSC Advances*, 14(23), 16432-16444. <https://doi.org/10.1039/d4ra01534g>
- Nikitasari, A., Priyotomo, G., Royani, A., & Sundjono, S. (2022). Exploration of Eucheuma Seaweed Algae Extract as a Novel Green Corrosion Inhibitor for API 5L Carbon Steel in Hydrochlorid Acid Medium. *International Journal of Engineering*, 35(3), 596-603. <https://doi.org/10.5829/ije.2022.35.03C.13>
- Nwoye, C., & Nwigwe, S. (2023). Novel Green Corrosion Inhibitor for Mild Steel Protection in an Alkaline Environment. *Portugaliae Electrochimica Acta* 43. <https://doi.org/10.4152/pea.2025430102>
- Omotioma, M., Onukwuli, O. D., & Nnanwube, I. A. (2024). Testing the inhibition efficiency of the castor oil leaf as corrosion inhibitor of mild steel in H₂SO₄. *Heliyon*, 10(10). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31168>
- Pai, G. D., Rathod, M. R., S K R., & Kittur, A. A. (2024). Effect of tabebuia heterophylla plant leaves extract on corrosion protection of low carbon steel in 1M HCl medium: Electrochemical, quantum chemical and surface characterization studies. *Results in Surfaces and Interfaces*, 15, 100203. <https://doi.org/10.1016/j.rsufri.2024.100203>
- Pandey, B., Pandey, D., Pant, N. P., Bhattarai, D. P., Dhakal, M., & Oli, H. B. (2024). Methanol extract of Murraya koenigii stem as green inhibitor for mild steel corrosion in 1 M HCl solution. *Results in Surfaces and Interfaces*, 16, 100245. <https://doi.org/10.1016/j.rsufri.2024.100245>
- Pereira, R., & Yarish, C. (2008). Mass Production of Marine Macroalgae. In S. E. Jørgensen & B. D. Fath (Eds.), *Encyclopedia of Ecology* (pp. 2236-2247). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00066-5>
- Policarpi, E. d. B., & Spinelli, A. (2020). Application

- of *Hymenaea stigonocarpa* fruit shell extract as eco-friendly corrosion inhibitor for steel in sulfuric acid. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 116, 215-222. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2020.10.024>
- R. Holla, B., Mahesh, R., Manjunath, H. R., & Anjanapura, V. R. (2024). Plant extracts as green corrosion inhibitors for different kinds of steel: A review. *Heliyon*, 10(14). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33748>
- Raja, P. B., & Sethuraman, M. G. (2008). Natural products as corrosion inhibitor for metals in corrosive media — A review. *Materials Letters*, 62(1), 113-116. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.04.079>
- Santos-Buelga, C., & San-Feliciano, A. (2017). Flavonoids: From Structure to Health Issues. *Molecules*, 22(3), 477. <https://doi.org/10.3390/molecules22030477>
- Shahini, M. H., Ramezanzadeh, M., Bahlakeh, G., & Ramezanzadeh, B. (2021). Superior inhibition action of the *Mish Gush* (MG) leaves extract toward mild steel corrosion in HCl solution: Theoretical and electrochemical studies. *Journal of Molecular Liquids*, 332, 115876. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.115876>
- Sowmyashree, A. S., Somya, A., Rao, S., Kumar, C. B. P., Al-Romaizan, A. N., Hussein, M. A., Khan, A., Marwani, H. M., & Asiri, A. M. (2023). Potential sustainable electrochemical corrosion inhibition study of *Citrus limetta* on mild steel surface in aggressive acidic media. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 984-994. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.039>
- Umoren, S. A., Solomon, M. M., Obot, I. B., & Suleiman, R. K. (2019). A critical review on the recent studies on plant biomaterials as corrosion inhibitors for industrial metals. *J. Ind. Eng. Chem.*, 76, 91-115. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.03.057>
- Umoren, S. A., Solomon, M. M., Obot, I. B., & Suleiman, R. K. (2021). Effect of Intensifier Additives on the Performance of Butanolic Extract of *Date Palm* Leaves against the Corrosion of API 5L X60 Carbon Steel in 15 wt.% HCl Solution. *Sustainability*, 13(10), 5569. <https://doi.org/10.3390/su13105569>
- Vargel, C. (2004). *Corrosion of Aluminium* (2 ed.). Elsevier Science. <https://doi.org/10.1016/C2012-0-02741-X>
- Wu, H., Deng, S., Shao, D., Wei, G., Xu, J., & Li, X. (2025). Synergistic mixture of *Parthenium hysterophorus* L. extract and potassium iodide as a novel efficient composite inhibitor on steel corrosion in sulfuric acid. *Journal of Materials Research and Technology*, 34, 1704-1720. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.12.178>
- Zaher, A., Aslam, R., Lee, H.-S., Khafouri, A., Boufellous, M., Alrashdi, A. A., El aoufir, Y., Lgaz, H., & Ouhsine, M. (2022). A combined computational & electrochemical exploration of the *Ammi visnaga* L. extract as a green corrosion inhibitor for carbon steel in HCl solution. *Arabian Journal of Chemistry*, 15(2), 103573. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103573>
- Zeng, C., Zhou, Z.-Y., Mai, W.-J., Chen, Q.-H., He, J.-B., & Liao, B.-K. (2024). Exploration on the corrosion inhibition performance of *Salvia miltiorrhiza* extract as a green corrosion inhibitor for Q235 steel in HCl environment. *Journal of Materials Research and Technology*, 32, 3857-3870. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.09.003>
- Zhang, M., Zhao, J., Dai, X., & Li, X. (2023). Extraction and Analysis of Chemical Compositions of Natural Products and Plants. *Separations*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/separations10120598>

Recepción: 18.11.2025

Revisión: 30.12.2025

Publicación: 08.05.2026

<https://orcid.org/0009-0008-5338-6732>

<https://orcid.org/0000-0001-9079-7452>

PROTEÍNAS DREB COMO INTERRUPTORES GENÉTICOS FRENTE AL ESTRÉS AMBIENTAL EN PLANTAS

DREB PROTEINS AS GENETIC SWITCHES FOR PLANT ADAPTATION TO ENVIRONMENTAL STRESS.

Alejandro Rodríguez Flores¹
Esmeralda Escobar Muciño^{2*}

¹Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Facultad de Ciencias Biológicas. Blvd. Valsequillo, Cd. Universitaria, Av. Central 72570 Puebla, Pue. Facultad de ciencias biológicas

²Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C. Cam. a la Presa de San José 2055, Lomas 4ta Secc., 78216 San Luis Potosí, S.L.P

Correos:

alejandro.rodriguezf@alumno.buap.mx

*autor de correspondencia: esmeralda.escobar@ipicyt.edu.mx

Resumen

Las plantas no pueden escapar cuando el ambiente se ha vuelto hostil. Frente a diversos tipos de estrés ambiental como la sequía, la salinidad o las bajas temperaturas, dependen de mecanismos moleculares precisos para adaptarse y sobrevivir. Entre ellos, destacan unas proteínas conocidas como factores de transcripción DREB (Dehydration-Responsive Element Binding, por sus siglas en inglés). Estas proteínas activan genes clave cuando la planta percibe condiciones de estrés. Su papel central en estas respuestas los convierte en candidatos atractivos para el desarrollo de cultivos más resistentes. Pero ¿cómo se organizan estos reguladores dentro del genoma? y ¿con qué otros genes interactúan?. Para responder a estas preguntas, el uso de bases de datos como NCBI y herramientas de análisis informático se vuelve imprescindible para describir la presencia y organización de los factores de transcripción DREB en 3 cultivos fundamentales en la agricultura y resistentes al estrés ambiental como el arroz (*Oryza sativa*), el jitomate (*Solanum lycopersicum*) y el maíz (*Zea mays*). El análisis permitió identificar factores DREB1F en las 3 especies de plantas analizadas y el factor transcripcional DREB1 en el jitomate, así como la presencia del dominio conservado AP2, esencial para la unión al ADN. Además, al examinar los contextos genómicos donde se localizan estos genes, se observaron asociaciones recurrentes con genes involucrados en la biosíntesis del azúcar protector llamado trehalosa, la señalización de ácido abscísico, la modificación de la pared celular y la regulación epigenética. Estas coincidencias sugieren que las proteínas DREB forman parte de redes genéticas coordinadas que fortalecen la capacidad de las plantas para enfrentar el estrés ambiental. En conjunto, este trabajo ofrece una mirada integradora a los mecanismos moleculares que permiten a las plantas resistir condiciones adversas y aportar información valiosa para futuras estrategias de mejora genética orientadas a la resiliencia agrícola.

Palabras clave:nProteínas DREB, dominio AP2, trehalosa, ácido abscísico, genes sensibles al frío (COR), estrés ambiental.

Abstract

Plants cannot escape when the environment becomes hostile. Faced with various types of environmental stress, such as drought, salinity, or low temperatures, they depend on precise molecular mechanisms to adapt and survive. Among these, proteins known as DREB (Dehydration-Responsive Element Binding) transcription factors stand out. These proteins activate key genes when the plant perceives stressful conditions. Their central role in these responses makes them attractive candidates for developing more resilient crops. But how are these regulators organized within the genome? And with which other genes do they interact? To answer these questions, the use of databases like NCBI and computational analysis tools becomes essential to describe the presence and organization of DREB transcription factors in three fundamental agricultural crops resistant to environmental stress: rice (*Oryza sativa*), tomato (*Solanum lycopersicum*), and maize (*Zea mays*).

The analysis identified DREB1F factors in all three plant species studied and the DREB1 transcription factor in tomato, as well as the presence of the conserved AP2 domain, essential for DNA binding. Furthermore, examining the genomic contexts in which these genes are located revealed recurrent associations with genes involved in trehalose biosynthesis, abscisic acid signaling, cell wall modification, and epigenetic regulation. These correlations suggest that DREB proteins are part of coordinated genetic networks that strengthen plants' ability to cope with environmental stress. Taken together, this work offers a comprehensive view of the molecular mechanisms that allow plants to withstand adverse conditions and provides valuable information for future breeding strategies focused on agricultural resilience.

Keywords: DREB proteins, AP2 domain, trehalose, abscisic acid, cold-sensitive genes (COR), environmental stress.

Introducción

Como las plantas viven ancladas al lugar donde germinan, estas no pueden desplazarse cuando el ambiente se vuelve hostil ni escapar de la falta de agua, la salinidad del suelo o las temperaturas extremas.

Su supervivencia depende de la capacidad de adaptarse a esas condiciones adversas. A lo largo de millones de años, los cultivos vegetales han estado expuestos a factores ambientales desfavorables que afectan su desarrollo y rendimiento, lo que ha impulsado la evolución de mecanismos biológicos especializados en la tolerancia al estrés abiótico (Dossa et al., 2016).

Cuando una planta enfrenta sequía, salinidad o temperaturas extremas, el impacto comienza a nivel celular. La fotosíntesis pierde eficiencia, las membranas celulares se vuelven inestables y se altera el equilibrio interno que sostiene el funcionamiento normal de los tejidos.

Si este daño celular se acumula, el crecimiento se ve limitado y la productividad disminuye de forma significativa. Por esta razón, las plantas han desarrollado respuestas integradas que combinan ajustes fisiológicos visibles con mecanismos moleculares capaces de reducir el daño y sostener los procesos vitales, incluso en ambientes altamente desfavorables (Dossa et al., 2016; Singh y Chandra, 2021).

Las condiciones que desencadenan este tipo de estrés abiótico tienen múltiples orígenes. La falta de precipitaciones, las temperaturas extremas, el exceso de irrigación, las altas tasas de evaporación y el cultivo en zonas áridas o semiáridas favorecen tanto la desecación como la acumulación de sales en el suelo.

La magnitud del problema resulta evidente en países como México, donde cerca del 30% de las 5.5 millones de hectáreas irrigadas presentan algún grado de salinidad, una condición que limita severamente la producción agrícola (Villar et al., 1997; Barkla et al., 2007).

Frente a este escenario, la capacidad de una planta para tolerar la sequía y salinidad depende en parte de respuestas fisiológicas claramente observables. Un crecimiento rápido y profundo del sistema radicular, acompañado de una reducción relativa de la parte aérea, mejora la captación de agua y reduciendo su pérdida. A ello se suma el cierre estomático y la capacidad de mantener la turgencia de los tejidos mediante ajustes osmóticos y cambios en la elasticidad de la pared celular. Estas estrategias permiten a la planta sobrevivir aun cuando el contenido de agua disminuye en forma considerable (Villar et al., 1997).

Sin embargo, detrás de estas respuestas visibles existe toda una red molecular altamente coordinada. La cual comienza, cuando la célula vegetal percibe las señales de estrés hídrico y salino a través de receptores localizados en la membrana y la pared celular. Estas señales activan cascadas de eventos internos en los que participan enzimas, proteínas transportadoras y sistemas de señalización. Este proceso culmina en la activación de factores de transcripción específicos que regulan la expresión de genes asociados a la tolerancia al estrés. La Figura 1 representa esta ruta molecular desde la percepción del estrés abiótico hasta la activación de los factores de transcripción DREB que conectan directamente las señales ambientales con la respuesta genética de la planta (Hasanuzzaman, 2020). (Figura 1)

El mecanismo molecular inicia cuando las plantas perciben las condiciones adversas como la sequía, la salinidad y las temperaturas extremas, y responden por medio de una compleja respuesta interna. En el centro de este mecanismo se encuentran los factores de transcripción, cuyo papel principal es actuar como interruptores genéticos, cuya actividad dependerá de cuándo el ambiente se vuelve hostil. Entre ellos, la subfamilia de proteínas

DREB (Dehydration Responsive Element Binding, por sus siglas en inglés), destaca por su papel central en la regulación de múltiples respuestas al estrés abiótico. Estos factores forman parte del supergrupo de proteínas conocidas como

APETALA2 o Factor de Respuesta al Etileno (AP2/ERF) y se caracterizan por reconocer secuencias específicas del ADN denominadas DRE o CRT (Worsley-Hunt et al., 2011; Singh y Chandra, 2021; Ma et al. 2024).

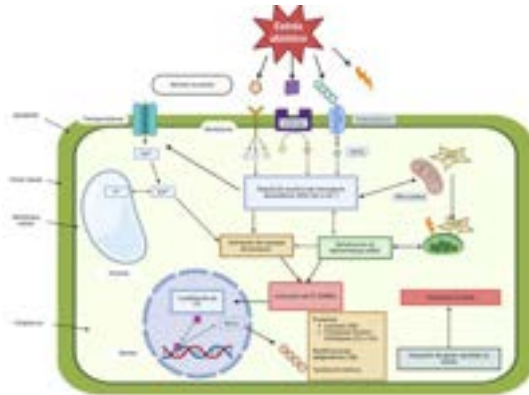


Figura 1. Mecanismo de activación de factores de transcripción (FT) DREB por fitohormonas y quinasas.

Figura elaborada en BioRender bajo una licencia institucional y modificada de Hasanuzzaman (2020).

Las secuencias de DRE o CRT están distribuidas a lo largo del genoma vegetal y funcionan como puntos de control que regulan la expresión génica en situaciones de estrés. Cuando los factores DREB se unen a estas secuencias, activan genes que permiten a la planta ajustar su metabolismo y su fisiología frente a la desecación y la salinidad. De esta forma, la respuesta al estrés deja de ser un evento aislado y se convierte en un programa genético coordinado (Magnani et al., 2004; Akhtar et al., 2012; Ma et al., 2024).

La capacidad de los factores DREB para cumplir esta función está directamente relacionada con su estructura. Todas las proteínas de la superfamilia AP2/ERF comparten un dominio conservado denominado dominio AP2, una región aminoacídica especializada que les permite unirse al ADN. Dentro de este dominio se localizan dos regiones con aminoácidos clave, conocidas como YRG y RAYD, que participan de manera directa en el reconocimiento de la secuencia DRE o CRT, con una secuencia de 6 nucleótidos (GCCGAC), que es esencial para la respuesta a la deshidratación. Gracias al

reconocimiento del dominio nucleotídico, los factores DREB pueden regular de forma precisa la expresión de genes asociados a la tolerancia al estrés abiótico (Magnani et al., 2004; Akhtar et al., 2012; Ma et al., 2024).

Tres especies de cultivos resultan fundamentales para la alimentación humana y la economía agrícola como el arroz (*Oryza sativa*), el jitomate (*Solanum lycopersicum*) y el maíz (*Zea mays*) pueden ser consideradas como modelos de cultivo por su valor productivo. Además, estas especies han sido ampliamente orientadas a la mejora genética de la tolerancia al estrés ambiental (Wang et al., 2008; Zhang et al., 2013; Choudhury, 2019; Kimotho et al., 2019).

Al analizar el interior de estos genomas, emerge un patrón revelador. En las tres especies se repite la presencia de los factores de transcripción DREB1 y DREB1F, ambos están estrechamente asociados con la respuesta a la desecación inducida por frío extremo y alta salinidad.

Estos reguladores transcripcionales pueden actuar tanto de manera dependiente como

independiente del ácido abscísico (ABA), una fitohormona clave en la señalización del estrés hídrico. Su función ha sido respaldada mediante estudios experimentales, tanto *in silico* como *in vivo*, confirmando su papel central en la adaptación vegetal (Wang et al., 2008; Choudhury, 2019; Kimotho et al., 2019).

La historia no termina ahí, porque los genes que codifican estos factores de transcripción aparecen rodeados de otros genes, que son igualmente relevantes para la supervivencia de las plantas en ambientes adversos.

Entre ellos se encuentran los genes implicados en la síntesis de azúcares solubles como la

trehalosa, en procesos de percepción del ácido abscísico, en la síntesis de la pared celular por medio de enzimas lacasas y procesos epigenéticos como la acetilación y la metilación del ADN.

Esta organización genómica sugiere una respuesta coordinada y eficiente frente al estrés ambiental, en la que múltiples mecanismos actúan de manera integrada para aumentar las probabilidades de supervivencia de las plantas (Wang et al., 2008; Zhang et al., 2013; Choudhury 2019; Kimotho et al., 2019; Maqsood et al., 2022).

Los dominios: la firma molecular del factor de transcripción DREB

La identidad de los factores de transcripción DREB no solo se reconoce por su función, sino también por su estructura. Estos reguladores comparten un rasgo distintivo: el dominio AP2, una región aminoacídica altamente especializada que les permite unirse al ADN y controlar la activación de genes implicados en la respuesta al estrés hídrico. Este dominio actúa como una firma molecular que distingue a las proteínas DREB de otros factores de transcripción presentes en el genoma vegetal (Riechmann y Meyerowitz, 1998).

Cuando se comparan secuencias de estos factores entre distintas especies, emergen regiones notablemente conservadas. Entre ellas, destacan los aminoácidos YRG y RAYD, que son segmentos clave para el reconocimiento del ADN (Su et al., 2025). Su conservación sugiere que cumplen un papel esencial en la función reguladora de estas proteínas y que han sido mantenidas a lo largo de la evolución. Con ayuda de los análisis bioinformáticos de alineamiento de proteínas se puede demostrar la similitud o diferencias entre las secuencias de los factores de transcripción de la familia

DREB. La Figura 2, representa justo el resultado del análisis bioinformático resumido en un alineamiento que contiene los dominios aminoacídicos característicos de los factores DREB identificados en nuestros cultivos modelo: *O. sativa*, *S. lycopersicum* y *Z. mays*. En la imagen se muestran pequeñas variaciones en la región aminoacídica "RAYD". En particular, se detecta que el aminoácido arginina (representado por la letra R), aparece con frecuencia sustituido por leucina (indicado como L).

Este tipo de sustitución, aunque sutil, puede tener consecuencias funcionales, debido a que cambios en la posición de los aminoácidos pueden modificar ligeramente la afinidad de las proteínas por el ADN o influir en su plegamiento tridimensional, afectando así la eficiencia con la que el factor de transcripción regula la expresión génica en respuesta al estrés ambiental. Estudios previos han señalado que este tipo de variaciones estructurales puede ajustar finalmente la respuesta al estrés sin comprometer la función general del factor DREB (Magnani et al., 2004; Hasanuzzaman, 2020).

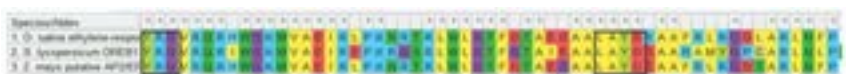


Figura 2. Alineamiento múltiple de las proteínas DREB. Las regiones de unión al ADN se muestran marcadas con los recuadros negros "YRG" y "RAYD" pero con el aminoácido arginina (R) sustituido por leucina (L). Figura elaborada en Mega X con secuencias obtenidas de la base de datos de NCBI.

Un viaje por los genomas en busca de genes que resisten a la sequía

En un mundo donde el agua es cada vez más escasa, las plantas han tenido que afinar sus estrategias de supervivencia.

Frente a la desecación, no sólo responden con cambios visibles en su forma de crecer, sino que activan complejos mecanismos moleculares que les permiten adaptarse y resistir. Muchas de estas estrategias quedan registradas en su ADN y se ponen en marcha cuando el estrés hídrico pone a prueba su capacidad de adaptación.

El punto de partida para comprender estos mecanismos es una base de datos que reúne información genética de organismos de todo el mundo, como el portal de NCBI (National Center for Biotechnology Information). Este repositorio funciona como un gran archivo de la historia evolutiva de la vida, donde cada secuencia genética aporta pistas sobre cómo las plantas han aprendido a enfrentar condiciones ambientales adversas a lo largo del tiempo (Tatusova et al., 2007).

Entre los miles de genes que conforman estos genomas, el factor de transcripción DREB destaca como reguladores centrales de la respuesta al estrés hídrico, ya que actúan como interruptores moleculares capaces de encender o apagar conjuntos completos de genes cuando la planta detecta la falta de agua (Wang et al., 2025). Sin embargo,

su importancia no reside únicamente en su función individual sino también en el contexto genómico en el que se encuentran. Al observar dónde se localizan estos factores dentro del genoma y que genes los rodean comienza a emerger un patrón. Los genes vecinos suelen estar relacionados con procesos clave para la tolerancia al estrés, lo que sugiere que la respuesta a la desecación no depende de un solo gen, sino de redes coordinadas que actúan de manera conjunta. Estos entornos conocidos como contextos genómicos, permiten identificar asociaciones que se repiten incluso entre especies distintas. La recurrencia de estos conjuntos genéticos sugiere que ciertas soluciones frente a la sequía han sido conservadas a lo largo de millones de años de evolución vegetal, debido a su eficacia para garantizar la supervivencia en ambientes con baja disponibilidad de agua.

A partir de la información disponible en la base de datos del NCBI es posible visualizar ejemplos de estos contextos genómicos donde se muestran los genes localizados río arriba y río debajo de los factores de transcripción asociados a la respuesta al estrés ambiental. Las figuras 3A a la 3D ilustran algunos de estos escenarios genéticos y permiten apreciar cómo se organiza a nivel del ADN la respuesta de las plantas frente a la desecación (NCBI, 2025).

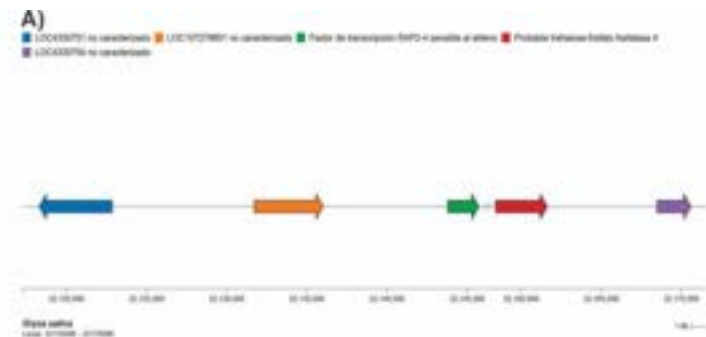




Figura 3. A) Contexto genómico de la proteína de unión al elemento sensible a la deshidratación 1F (NP_001359120.1) a partir del genoma de *O. sativa*. B) Contexto genómico de la proteína de unión al elemento sensible a la deshidratación 1 (NP_001234689.1) a partir del genoma de *S. lycopersicum*.

C) Contexto genómico de la proteína de unión a elementos sensibles a la deshidratación tipo 1F (XP_004228864.2) a partir del genoma de *S. lycopersicum*. D) Contexto genómico para la proteína de unión al elemento sensible a la deshidratación 1F (XP_008674480.1) a partir del genoma de *Z. mays*.

Al analizar estos contextos genómicos, llama la atención la gran cantidad de genes que aparecen alrededor de los factores de transcripción asociados a la respuesta al estrés. Muchos de ellos codifican proteínas indispensables para procesos vitales de la planta. Sin embargo, dentro de esta complejidad genética, algunos patrones resultan especialmente reveladores cuando el foco se coloca en la tolerancia a condiciones ambientales extremas.

Al seguir esta pista, los contextos genómicos del arroz, el jitomate y el maíz muestran una coincidencia notable. En las 3 especies aparecen genes relacionados con la respuesta al etileno, con la unión a elementos de respuesta a la deshidratación tipo 1 y con proteínas pertenecientes a la superfamilia AP2 o EREBP. Esta combinación no es casual. La presencia reiterada de estos genes permite reconocer con claridad las secuencias que codifican para los factores de transcripción DREB, ya que este tipo de proteínas se caracteriza precisamente por reunir estas propiedades funcionales (Worsley-Hunt et al., 2011; Singh y Chandra, 2021; Ma et al., 2024).

Las figuras 4A a la 4C muestran algunos de estos contextos genómicos en *O. sativa*, *S. lycopersicum* y *Z. mays*. En ellas, se aprecia cómo los genes asociados a la percepción hormonal, a la regulación de la expresión génica y a la respuesta directa frente a la desecación se agrupan alrededor de los factores DREB. Esta organización sugiere que la respuesta al estrés ambiental no depende de un solo regulador sino de conjuntos de genes que actúan de manera coordinada formando auténticos módulos genéticos especializados en la supervivencia bajo condiciones adversas. Lejos de ser un fenómeno aislado, la repetición de este patrón en especies de plantas tan distintas refuerza la idea de que estas soluciones moleculares han sido conservadas a lo largo de la evolución vegetal ahí donde el agua escasea o el ambiente se vuelve extremo: el genoma parece recurrir una y otra vez a los mismos protagonistas para sostener la vida.

Este recorrido por los genomas se complementa al mirar más allá de la secuencia y adentrarse en lo que otros estudios han revelado sobre el papel de estos genes en plantas modelo.





Figura 4. A) Contexto genómico del factor de transcripción sensible al etileno (flecha de color rojo) con cercanía a un gen codificante para una probable trehalosa-fosfato fosfatasa del tipo 4 (flecha de color verde) a partir del genoma de *O. sativa*. B) Contexto genómico de la proteína de unión al elemento sensible a la deshidratación tipo 1 (flecha de color verde) con cercanía a genes codificantes para: una lacasa (flecha de color rojo), un receptor de ácido abscísico (flecha de color azul) y una proteína con funciones en la remodelación de cromatina y metilación del ADN (flecha de color naranja) a partir del genoma de *S. lycopersicum*. C) Contexto genómico de la proteína perteneciente a la superfamilia AP2/EREBP (flecha de color verde) con cercanía a una secuencia codificante de una trehalosa-6-fosfato fosfatasa del tipo 4 (flecha de color azul) a partir del genoma de *Z. mays*.

La literatura científica ofrece múltiples ejemplos que refuerzan la idea de que los factores de transcripción DREB desempeñan un papel central en la respuesta vegetal al estrés ambiental. En el caso del jitomate se ha documentado la presencia del factor DREB1, por medio del estudio de un gen del tipo CBF, conocido como *SsCBF1*, aislado a partir de *S. lycopersicoides*, una especie notablemente resistente al frío. Este gen codifica una proteína con dominio AP2 capaz de unirse al ADN y se activa frente a bajas temperaturas, sequía y alta salinidad. La activación de este regulador se asocia con una mayor tolerancia a la congelación, lo que confirma que los factores DREB, en particular los del grupo CBF, participan activamente en la adaptación al estrés abiótico (Worsley-Hunt et al., 2011; Zhang et al., 2013).

Este papel regulador también se ha explorado desde una perspectiva genómica. Un análisis a escala de todo el genoma de *S. lycopersicum* permitió identificar y caracterizar a los genes DREB junto con sus elementos promotores. En este contexto, el gen *SLDREB1* destaca por su participación en la respuesta al estrés hídrico,

promoviendo la acumulación de azúcares solubles y otros osmolitos que ayudan a la célula vegetal a mantener el equilibrio osmótico cuando el agua escasea (Maqsood et al., 2022).

En el arroz, DREB1F es otro miembro de esta familia el factor de transcripción se activa ante señales ambientales como la salinidad, la sequía, el frío y la presencia de ABA. Estudios funcionales han demostrado que la sobreexpresión del factor transcripcional en *Arabidopsis thaliana* incrementa la tolerancia a estos mismos tipos de estrés lo que refuerza la idea de que se trata de un regulador conservado y eficaz en distintos linajes vegetales (Wang et al., 2008). Mientras que el jitomate vuelve a ofrecer pistas interesantes en este escenario. Un estudio detallado de la familia AP2 reveló la presencia de numerosos dominios conservados en su genoma, entre ellos, el correspondiente al gen DREB1F identificado como "Slyoc01g009440.1.1". Este hallazgo abre la puerta a nuevas estrategias para mejorar la tolerancia al estrés ambiental mediante la modulación de este regulador clave (Choudhury, 2019). Finalmente, en el maíz la

respuesta al estrés también se construye a partir de redes de regulación más amplias. Se ha descrito que el factor de transcripción ZmWRKY17, perteneciente a la familia WRKY, influye en la expresión de los genes DREB1F. Esta interacción forma parte de una respuesta en cascada activada por sequía, salinidad y señales hormonales como la ABA, confirmando

la presencia y relevancia de este gen en maíz (Kimotho et al., 2019). En conjunto, estas evidencias refuerzan una idea central, aunque cada especie enfrenta los desafíos ambientales a su manera, muchas de las soluciones moleculares que sustentan su resistencia están compartidas y profundamente conservadas en el genoma vegetal.

Influencia de los genes DREB en trehalosa, ABA, lignina y acetilación del ADN

Al profundizar en los genomas del arroz, tomate y maíz, se observa que los genes DREB no se encuentran aislados. Por el contrario, aparecen de manera recurrente acompañados por otros genes de gran relevancia para la adaptación al estrés ambiental. Llama la atención que, independientemente de la especie, cuatro tipos de contextos genómicos se repiten de forma consistente. Entre ellos, se encuentran los genes que codifican proteínas similares a CLASSY 1, portadoras del dominio SNF2, implicadas en la remodelación de la cromatina y en procesos de metilación de ADN (Zhou, 2018). También, aparecen genes relacionados con la producción de trehalosa en particular aquellos que codifican para la trehalosa fosfato fosfatasa, una enzima clave para la generación de este azúcar protector (Kerbler et al., 2023).

A esto, se suman genes similares a las lacasas, asociados con la degradación y reorganización de la lignina, así como receptores de ácido abscísico del tipo PYL4, fundamentales para la percepción de señales hormonales (Zhong, 2019; Zhang et al., 2022).

La reiterada cercanía entre los genes DREB y estos elementos sugiere que la respuesta al estrés no depende de un solo regulador, sino de una red coordinada de procesos moleculares. Para comprender mejor esta relación, resulta necesario recurrir a la literatura científica y explorar cómo estos mecanismos contribuyen a la adaptación de las plantas frente a distintos factores ambientales. Uno de los primeros niveles de regulación ocurre en la propia estructura del ADN. La acetilación y la

metilación del material genético son procesos esenciales para controlar qué genes se activan y cuáles permanecen silenciados. Durante el estrés ambiental, la acetilación de histonas, en particular de la histona H3, favorece la activación de genes sensibles al frío, conocidos como genes COR. En maíz, se ha demostrado que la actividad de histonas desacetilasas se asocia con un aumento en expresión de genes como ZmDREB1, reforzando la conexión entre la regulación epigenética y los factores DREB en la respuesta al frío (Ramakrishnan et al., 2022).

Otro componente clave de esta respuesta es trehalosa, un azúcar altamente soluble no reductora y compatible con el metabolismo celular. En las plantas la síntesis de trehalosa, es a través de una única vía metabólica que involucra dos pasos catalizados por las enzimas conocidas como “trehalosa 6 fosfato sintasa” y “trehalosa 6 fosfato fosfatasa”.

Estudios en *A. thaliana* han identificado al gen *AtTPPI*, que codifica para la enzima trehalosa 6-fosfato fosfatasa, como un regulador importante en la tolerancia a la sequía. Su acción influye en procesos como la apertura de las estomas y el crecimiento primario de la raíz permitiendo a la planta ajustarse mejor a la escasez de agua (Lin et al., 2023).

Un detalle particularmente revelador es que la región promotora de *AtTPPI* contiene un elemento cis del tipo DRE/CRT, caracterizado por la secuencia ACCGAC. Este elemento puede ser reconocido por los factores de transcripción DREB, lo que confirma que estos reguladores no sólo responden al estrés, sino que participan

directamente en el control de genes involucrados en la síntesis de trehalosa (Lin et al., 2023). La estructura física de la planta también desempeña un papel crucial en la tolerancia al estrés. La pared celular secundaria, cuyo componente principal es la lignina, contribuye al refuerzo mecánico de los tejidos y a la protección frente a condiciones adversas como la salinidad o el estrés osmótico. Se ha observado que la acumulación de lignina y el engrosamiento de la pared celular forma parte de una respuesta adaptativa común. En estudios realizados en manzano, la sobreexpresión de genes asociados a la pared secundaria ha mostrado que estos pueden activarse tanto por señales hormonales como por estrés salino, interactuando directamente con factores DREB y favoreciendo una mayor resistencia al ambiente adverso (Dabravolski e Isayenkov, 2023). En este entramado molecular, las fitohormonas ocupan un lugar central y entre ellas destaca el ABA. Esta hormona regula procesos fundamentales como la germinación, el crecimiento al cierre de estomas y la expresión génica durante la síntesis e influye

en la susceptibilidad a patógenos. La relación entre ABA y los factores DREB es estrecha y bidireccional. Por un lado, ciertos DREB pueden activar genes involucrados en la biosíntesis de ABA, como *NCED9* durante la germinación en *Arabidopsis*. Por otro lado, la presencia de ABA mantiene elevado los niveles de expresión de genes como *DREB2C*, lo que indica que estos factores también son inducidos por la hormona, reforzando así la respuesta adaptativa de la planta (Je et al., 2014).

En conjunto, estos mecanismos muestran cómo los factores de transcripción DREB se integran a una red compleja que conecta la regulación epigenética, el metabolismo y la estructura celular y la señalización hormonal. Comprender estas interacciones permite anticipar cómo las plantas responden a condiciones ambientales adversas y ofrece una base sólida para interpretar los modelos de respuesta al estrés. En la figura 5 se representa un esquema integrado que resume este mecanismo putativo, obtenido después del análisis de los contextos genómicos realizados en arroz, jitomate y maíz.

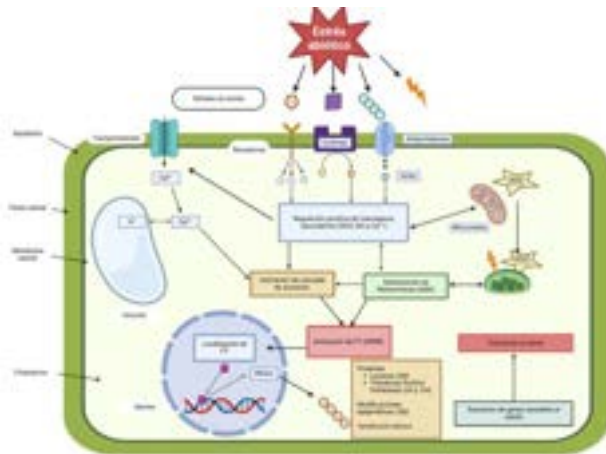


Figura 5. Modelo putativo de la acción de los factores de transcripción DREB y su relación con la biosíntesis de trehalosa, la degradación de lignina y la regulación epigenética, asociados a la tolerancia al estrés ambiental en *O. sativa* (Os), *S. lycopersicum* (Sl) y *Z. mays* (Zm). Figura elaborada en BioRender bajo una licencia institucional y modificado de Hasanuzzaman (2020). (<https://doi.org/10.1007/978-981-15-2172-0>).

Conclusiones

En un planeta donde el agua es cada vez más escasa y el clima es impredecible, las plantas no tienen otra opción que adaptarse o desaparecer. Este trabajo permite asomarse al interior de las adaptaciones de las plantas, explorando los genomas de tres cultivos esenciales: arroz, jitomate y maíz, en busca de las claves que les permiten resistir a las condiciones extremas. En este viaje genético, los factores de transcripción DREB aparecen como verdaderos directores de orquesta, coordinando redes completas de genes. Estas redes están relacionadas con la protección celular, el metabolismo, la estructura de la pared vegetal y la acción de hormonas como el ácido abscísico.

Estas redes, sorprendentemente conservadas entre especies muy distintas, muestran que la evolución ha reutilizado estrategias eficaces una y otra vez para enfrentar la sequía, el frío y la salinidad.

Entender cómo funcionan estos mecanismos no sólo satisface la curiosidad científica. También ofrece pistas valiosas para el futuro de la agricultura. Descifrar cómo las plantas sobreviven al estrés abre la posibilidad de desarrollar cultivos más resistentes, capaces de prosperar en un mundo cambiante. En última instancia, conocer estas historias ocultas en el ADN vegetal es una forma de prepararnos mejor para nuevos desafíos.

Conflicto de intereses

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Los autores se descargan de responsabilidad (INTELIGENCIA ARTIFICIAL) Los autores declaran por la presente que NO se han utilizado tecnologías de IA generativa, tales como modelos de lenguaje grandes (*ChatGPT*, *COPILOT*, etc.) y generadores de texto a imagen, durante la redacción o edición de este manuscrito.

Agradecimientos

Los autores agradecen al SECIHTI, por el otorgamiento de la beca de estancia postdoctoral a EEM (CVU: 406969).

Referencias

- Akhtar, M., Jaiswal, A., Taj, G., Jaiswal, J. P., Qureshi, M. I., Singh, N. K. (2012). DREB1/CBF transcription factors: their structure, function and role in abiotic stress tolerance in plants. *Journal of Genetics*, 91(3):385–395. <https://doi.org/10.1007/s12041-012-0201-3>.
- Barkla, B. J., Vera-Estrella, R., Balderas, E., Pantoja, O. (2007). Mecanismos de tolerancia a la salinidad en plantas. *Biotechnología*, 14:263-272.
- Choudhury, S. (2019). In silico analysis of ERF family in Arabidopsis, Oryza and Solanum crop plants. *Genomics Plant Breed*, 3:34-44.
- Dabravolski, S. A., Isayenkov, S. V. (2023). The regulation of plant cell wall organisation under salt stress. *Frontiers in Plant Science*, 14:1-16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1118313>.
- Dossa, K., Wei, X., Li, D., Fonceka, D., Zhang, Y., Wang, L., Yu, J., Boshou, L., Diouf, D., Cissé, N., Zhang, X. (2016). Insight into the AP2/ERF transcription factor superfamily in sesame and expression profiling of DREB subfamily under drought stress. *BMC Plant Biology*, 16(1): 1-16. <https://doi.org/10.1186/s12870-016-0859-4>.
- Hasanuzzaman, M. H. (2020). Plant ecophysiology and adaptation under climate change: mechanisms and perspectives ii: mechanisms of adaptation and stress amelioration [Springer Nature Link]. In Springer eBooks (1st ed.). Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-2172-0>.
- Jihyun J., Huan C., Chieun S. (2014). Arabidopsis DREB2C modulates ABA biosynthesis during germination. *Biochemical and biophysical research communications*, 452:1-8. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2014.08.052>.
- Kerbler, S. M. L., Armijos-Jaramillo, V., Lunn, J. E., Vicente, R. (2023). The trehalose 6-phosphate phosphatase family in plants. *Physiologia Plantarum*, 175(6):1-19. <https://doi.org/10.1111/pp1.14096>.
- Kimotho R.N., Baillo E.H., Zhang Z. (2019). Transcription factors involved in abiotic stress responses in Maize (*Zea mays* L.) and their roles in enhanced productivity in the post genomics era. *PeerJ*, 8(7):1-46. <https://doi.org/10.7717/peerj.7211>.
- Ma Z., Hu L., Jiang W. (2024). Understanding AP2/ERF transcription factor responses and tolerance to various abiotic stresses in plants: a comprehensive review. *International Journal Molecular Sciences*, 25(2):11-22. <https://doi.org/10.3390/ijms25020893>.
- Magnani E., Sjölander K., Hake S. (2004). From endonucleases to transcription factors: evolution of the AP2 DNA binding domain in plants. *Plant Cell*, 16(9):2265-77. <https://doi.org/10.1105/tpc.104.023135>.
- Maqsood H., Munir F., Amir R., Gul A. (2022). Genome-wide identification, comprehensive characterization of transcription factors, cis-regulatory elements, protein homology, and protein interaction network of DREB gene family in *Solanum lycopersicum*. *Plant Sciences*, 13:1-29. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1031679>.
- Qingfang L., Jianyong W., Jiaxin G., Zhiliang Z., Song W., Jing S., Qianqian L., Xu G., Jihong J., Shilian Q. (2023). The Arabidopsis thaliana trehalose-6-phosphate phosphatase gene AtTPPI improve chilling tolerance through accumulating soluble sugar and JA. *Environmental and Experimental Botany*, 205:1-12. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.105117>.

- Ramakrishnan M., Zhang Z., Mullasser S., Kalendar R., Ahmad Z., Sharma A., Liu G., Zhou M., Wei Q. (2022). Epigenetic stress memory: a new approach to study cold and heat stress responses in plants. *Frontiers in Plant Science*. 13:11-17. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1075279>.
- Riechmann, J. L., Meyerowitz, E. M. (1998). The AP2/EREBP family of plant transcription factors. *Biological Chemistry*. 379:633-646. <https://doi.org/10.1515/bchm.1998.379.6.633>.
- Singh, K., Chandra, A. (2021). DREBs-potential transcription factors involve in combating abiotic stress tolerance in plants. *Biología*. 76:3043-3055. <https://doi.org/10.1007/s11756-021-00840-8>.
- Su, Z. L., Li, A. M., Wang, M., Qin, C. X., Pan, Y. Q., Liao, F., Zhong-Liang C., Bao-Qing Z., Wen-Guo C., Huang, D. L. (2025). The role of AP2/ERF transcription factors in plant responses to biotic stress. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(10):1-14. <https://doi.org/10.3390/ijms26104921>.
- Tatusova, T., Smith-White, B., Ostell, J. (2007). A collection of plant-specific genomic data and resources at NCBI. In *Plant Bioinformatics: Methods and Protocols* (pp. 61-87). Totowa, NJ: Humana Press. https://doi.org/10.1007/978-1-59745-535-0_3.
- Villar-Salvador, P., Bueno, L., Rubira, J., Inmaculada, C., Manzano, S., Lereña (1997). Efecto de diferentes niveles de endurecimiento por estrés hídrico en el contenido de nutrientes y la resistencia a la desecación de plántulas de *Pinus halepensis* Mill. pp: 674.
- Wang, J., Pan, J., Duan, Y., Wang, L., Jing, D., Dang, J., Guo, Q. (2025). Characterization of DREB family genes in loquat and their co-expression network analysis in response to drought. *BMC Plant Biology*, 25(1):1-13. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-07448-z>.
- Wang, Q., Guan, Y., Wu, Y., Chen, H., Chen, F., Chu, C. (2008). Overexpression of a rice OsDREB1F gene increases salt, drought, and low temperature tolerance in both *Arabidopsis* and rice. *Plant Molecular Biology*, 67(6):589-602. <https://doi.org/10.1007/s11103-008-9340-6>.
- Worsley-Hunt, R., Bernard, V., Wasserman, W.W. (2011). Identification of cis-regulatory sequence variations in individual genome sequences. *Genome Medicine*, 3:1-14. <https://doi.org/10.1186/gm281>.
- Zhang, L., Li, Z., Li, J., Wang, A. (2013). Ectopic overexpression of SsCBF1, a CRT/DRE-binding factor from the nightshade plant *Solanum lycopersicoides*, confers freezing and salt tolerance in transgenic *Arabidopsis*. *PLoS ONE*, 8(6):1-15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0061810>.
- Zhang, Y., Zhao, Y., Li, T., Ni, C., Han, L., Du, P., Xiao, K. (2022). TaPYL4, an ABA receptor gene of wheat, positively regulates plant drought adaptation through modulating the osmotic stress-associated processes. *BMC Plant Biology*, 22(1):11-21. <https://doi.org/10.1186/s12870-022-03799-z>.
- Zhong, R., Cui, D., Ye, Z. H. (2019). Secondary cell wall biosynthesis. *New Phytologist*, 221(4):1703-1723. <https://doi.org/10.1111/nph.15537>.
- Zhou, M., Palanca, A. M. S., Law, J. A. (2018). Locus-specific control of the de novo DNA methylation pathway in *Arabidopsis* by the CLASSY family. *Nature genetics*, 50(6):865-873. <https://doi.org/10.1038/s41588-018-0115-y>.

Recepción: 09.02.2026

Revisión: 01.03.202

Publicación: 08.05.2026

<https://orcid.org/0000-0001-9330-4123>

<https://orcid.org/0009-0003-7330-3619>

<https://orcid.org/0009-0002-4992-0521>

<https://orcid.org/0009-0008-2167-5388>

<https://orcid.org/0000-0001-7186-4429>

MCM-41: MATERIAL INNOVADOR EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y APLICACIONES DIGITALES EMERGENTES

MCM-41: INNOVATIVE MATERIAL IN INFORMATION TECHNOLOGIES AND EMERGING DIGITAL APPLICATIONS

Yesmin PanecatI-Bernal¹

María de Jesús Juárez-Sánchez²

Esmeralda Centeno-Castillo²

Minerva Matlalcuatzi-Cruz²

José Joaquín Alvarado-Pulido³(*)

¹Centro Tecnológico Aragón, Facultad de Estudios Superiores Aragón,
Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Universidad Nacional S/N,
Bosques de Aragón, Cdad. Nezahualcóyotl, C.P. 57171, México.

²Ingeniería Tecnologías de la Información e Innovación Digital, Universidad
Tecnológica de Tecamachalco, Av. Universidad Tecnológica 1, Barrio la Villita,
Tecamachalco, Puebla, C.P. 75483, México.

³Centro de Investigación en Dispositivos Semiconductores, Instituto de Ciencias,
ICUAP, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Av. 14 Sur y Av. San Claudio,
Col. San Manuel, Puebla, Puebla, C.P. 72560, México

*Autor de correspondencia:

apoyo2.mecanica@aragon.unam.mx, 24326010@estudiante.uttecarn.edu.mx,
esmeralda.cc@personal.uttecarn.edu.mx, minerva.mc@personal.uttecarn.edu.
mx, joaquin.alvarado@correo.buap.mx

Resumen

El presente trabajo destaca la relevancia del material mesoporoso MCM-41 como una alternativa innovadora y prometedora especialmente en el ámbito de las tecnologías de la información y la innovación digital. Gracias a su estructura ordenada, alta área superficial y propiedades fisicoquímicas únicas, el MCM-41 se perfila como un componente clave en el diseño de dispositivos avanzados como sensores ambientales, capacitores MOS, sistemas neuromórficos y láseres de nueva generación. Estos desarrollos tienen aplicaciones potenciales en campos emergentes como el Internet de las Cosas (IoT), la inteligencia artificial y la computación cuántica. A pesar de sus ventajas, la investigación sobre el uso educativo y tecnológico del MCM-41 aún es limitada, lo que representa una oportunidad estratégica para impulsar estudios interdisciplinarios que vinculen ciencia de materiales, ingeniería electrónica y formación académica. Este enfoque puede fomentar el pensamiento crítico, la creatividad y la participación activa de estudiantes en proyectos de innovación sustentable.

Palabras clave: MCM-41, dispositivos electrónicos, tecnologías de la información, innovación digital, educación científico-tecnológica.

Abstract

This work highlights the relevance of the mesoporous material MCM-41 as innovative and promising, especially in the field of information technologies and digital innovation. Thanks to its ordered structure, high surface area, and unique physicochemical properties, MCM-41 emerges as a key component in the design of advanced devices such as environmental sensors, MOS capacitors, neuromorphic systems, and next-generation lasers. These developments have potential applications in emerging fields such as the Internet of Things (IoT), artificial intelligence, and quantum computing. Despite its advantages, research on the educational and technological use of MCM-41 is still limited, which represents a strategic opportunity to promote interdisciplinary studies linking materials science, electronic engineering, and academic training. This approach can foster critical thinking, creativity, and active student participation in sustainable innovation projects.

Keywords: MCM-41, electronic devices, information technologies, digital innovation, scientific-technological education.

Introducción

Las tecnologías de la información (TI) constituyen el conjunto de herramientas y sistemas empleados para crear, almacenar, procesar y transmitir información, abarcando desde hardware y software hasta redes de telecomunicaciones y datos (Torres Manrique & Torres Manrique, 2024). La innovación digital, por su parte, representa la aplicación estratégica de estas tecnologías para generar soluciones transformadoras que optimizan procesos, fomentan la eficiencia y crean nuevos productos y servicios en diversos sectores (Aguado Cortés et al., 2024). Esta innovación va más allá de la simple adopción tecnológica, ya que implica automatizar procesos para reducir tiempos de ejecución, mejorar la productividad mediante la optimización de recursos, facilitar la colaboración a distancia, desarrollar soluciones disruptivas como los servicios fintech, y analizar grandes volúmenes de información para la toma de decisiones estratégicas (Russo et al., 2024). Entre los ejemplos más destacados de innovación digital se encuentran los dispositivos inteligentes, el Internet de las cosas (IoT) que conecta objetos cotidianos a la red, los sistemas avanzados de ciberseguridad para proteger información sensible, y los sistemas inteligentes que replican capacidades de la inteligencia humana (Storey et al., 2025). El Internet de las cosas (IoT) es una red de dispositivos físicos interconectados mediante sensores, software y conectividad que permite recopilar, compartir y analizar datos en tiempo real. Esta tecnología faci-

lita la comunicación autónoma entre dispositivos inteligentes, lo que permite supervisar parámetros como temperatura, humedad, calidad del aire y rendimiento, optimizando operaciones empresariales. Entre sus principales beneficios destacan la mejora de la eficiencia, la toma de decisiones basada en datos, el ahorro de costos mediante automatización de tareas, y la personalización de la experiencia del cliente (Zong et al., 2025).

Actualmente, en la era del mundo de tecnologías de la información e innovación digital se requiere la exploración de nuevos materiales avanzados para el desarrollo de sensores, dispositivos con inteligencia artificial, capacitores, chips, entre otros. Entre estos materiales prominentes, el material mesoporoso MCM-41 es un candidato idóneo para estas aplicaciones debido a sus propiedades fisicoquímicas únicas que lo han usado en catálisis, remediación ambiental, liberación de fármacos principalmente (de Queiros Souza et al., 2025). Es escasa su exploración en el área de tecnologías de la información e innovación digital. En este trabajo se tiene como objetivo mostrar las propiedades que tiene el MCM-41 para el desarrollo de sensores y dispositivos electrónicos que se pueden usar en el área de tecnologías de la información e innovación digital. Para poder en el futuro desarrollar proyectos interdisciplinarios que fomenten la creatividad y pensamiento crítico en la educación STEM.

¿Por qué la síntesis y caracterización del MCM-41 son claves para el futuro de la ciencia y la tecnología?

El material mesoporoso MCM-41 (Mobil Composition of Matter No. 41) de composición química óxido de silicio (SiO_2) que fue descubierto por la compañía Mobil Corporation Oil en 1992 como parte de la familia M41S, posee un arreglo hexagonal con una estructura ordenada de poros análogo a un panal de abeja en el rango de 2 a 10 nm con una gran área superficial específica entorno de 1000 m²/g y tiene estabilidad térmica. Estas propiedades hacen que este material tenga diferentes aplicaciones

como ha sido reportado en la literatura para catálisis, adsorción, liberación controlada de fármacos y sensores químicos. Debido a que la superficie del MCM-41 posee diferentes grupos funcionales como los hidroxilos (OH) o silanol es factible alojar diferentes moléculas orgánicas e inorgánicas en sus cavidades formando composites para aplicaciones nanotecnológicas. (Martínez-Edo et al., 2018). Por ejemplo, Bravo de Luciano G.M. et al. (Bravo de Luciano et al., 2022). reportó la incorpora-

ción de nanopartículas metálicas de plata en los poros del MCM-41 para el desarrollo de un capacitor MIS. Este material mesoporoso se puede obtener en forma de polvo o de película, siendo versátil para diferentes aplicaciones (Bernal et al., 2019).

La síntesis del material mesoporoso MCM-41 se basa en el uso de surfactantes catiónicos como el bromuro de hexadeciltrimetilamonio (CTAB) que van a formar una micela esférica común-

mente en un medio básico y estas micelas se auto ensamblan formando rodillos micelares y los rodillos micelares se ordenan formando una estructura hexagonal. Esta estructura hexagonal es recubierta por una fuente de sílice como el tetraetilortosilicato (TEOS), formando el MCM-41. La estabilidad mecánica del material es adquirida por tratamientos térmicos (Habeche et al., 2020). La Figura 1 muestra una representación esquemática del proceso de formación del MCM-41.

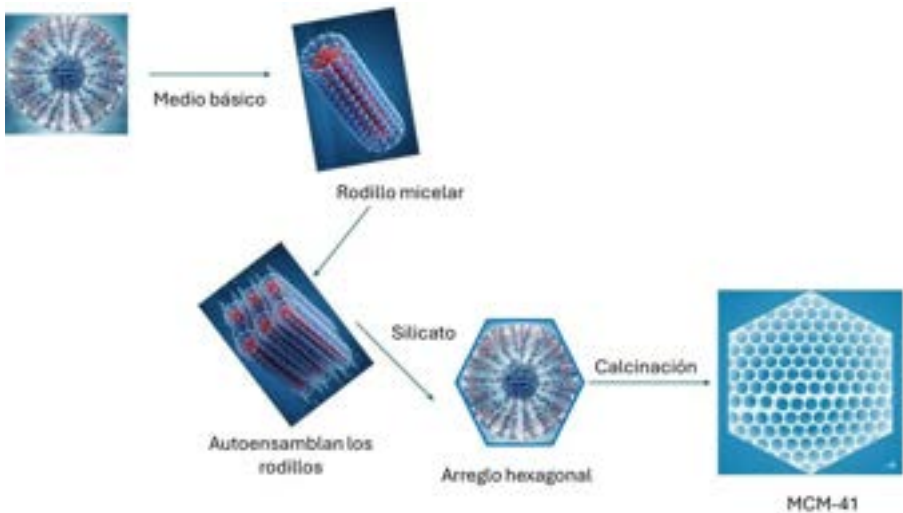


Figura 1. Representación esquemática del proceso de formación del MCM-41.

Fuente Propia

La literatura reporta diferentes métodos de síntesis del material MCM-41 como se enuncian a continuación: proceso hidrotérmico convencional, síntesis asistida por microondas y por ultrasonido.

Las técnicas clásicas de caracterización estructural y morfológica de este material mesoporoso usadas son SEM (microscopía electrónica de barrido) para ver la morfología del material, EDS (espectroscopia de energía dispersiva) para

conocer la composición química del MCM-41, TEM (microscopía electrónica de transmisión) para ver los poros y planos del material, DRX (difracción de rayos-x) para determinar la estructura cristalina del MCM-41, FTIR (espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier) para identificar los grupos funcionales del material. Además, se realizan pruebas texturales usando la técnica de adsorción y desorción de nitrógeno para conocer el área superficial, volumen y diámetro de poro.

¿Sabes cuales son las aplicaciones del MCM-41 en el área de tecnologías de la información e innovación digital?

Debido a las propiedades que posee en el material mesoporoso MCM-41 puede ser usado en diferentes aplicaciones de tecnologías de la información e innovación digital como sensores, capacitores MOS y dispositivos neuromórficos principalmente.

Sensores.

Un sensor en el contexto de internet de las cosas (IoT), es un dispositivo que detecta y mide condiciones ambientales o físicas, tales como temperatura, movimiento y las convierte en una señal eléctrica o digital que puede ser procesado en un sistema computacional. Los tipos de sensores relacionados con IoT son ambientales, eléctricos, presencia y movilidad, electromagnéticos, ópticos, químicos y físicos (Brida et al., 2021) como se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Tipos de sensores para IoT.

De Los 10 principales tipos de sensores IoT, casos de uso y ejemplos, por Simbase, 2026, sitio web de Simbase (Los 10 principales tipos de sensores IoT, casos de uso y ejemplos) Copyright 2026 por Simbase.

Para el desarrollo de sensores existe una amplia gama de materiales que pueden emplearse, tales como nanopartículas metálicas, semiconductores, nanoestructuras de carbono, materiales bidimensionales (2D), materiales piezoeléctricos y nanocomposites. La selección del material apropiado depende de la función específica del sensor y del analito a detectar, buscando establecer una afinidad adecuada entre ambos (Ju et al., 2023).

El MCM-41 posee una gran superficie específica que es un parámetro importante para el área de sensado. La literatura reporta sensores químicos, gases. Por ejemplo, Panecatí-Bernal Y et al. (Panecatí-Bernal et al., 2023) reportó un estudio de un dispositivo capacitor MIS (metal-aislante-semiconductor) basado en el MCM-41 para detección de diferentes tipos de solventes polares próticos (metanol, etanol, isopropanol) y apróticos (DMSO, acetona, DMF) y no polares (hexano, tolueno, xileno).

Capacitores MOS

El capacitor MOS (metal-óxido-semiconductor) es un dispositivo cuya función principal es almacenar cargas eléctricas, como se ilustra en la Figura 3. Este tipo de dispositivos son fundamentales en tecnología de semiconductores (Hou et al., 2024).



Figura 3. Representación esquemática de la estructura de un capacitor MOS. Fuente propia.

Los capacitores MOS en IoT tienen diferentes aplicaciones: como sensores capacitivos para detectar proximidad, humedad, radiación, presión o nivel de líquidos; en almacenamiento y gestión de energía (ver Figura 4), donde pueden almacenar pequeñas cantidades de energía y regular voltajes en circuitos integrados; y en la miniaturización de componentes, ya que la tecnología MOS permite fabricar capacitores de tamaño reducido para integrarlos en dispositivos portátiles, wearables y sensores embebidos (Cheng et al., 2021).

El MCM-41 se comporta como un material aislante debido a su composición química que es óxido de silicio (SiO_2), siendo esta propiedad importante para el desarrollo de dispositivos capacitores MOS (metal-óxido-semiconductor) con valores altos de capacitancia, debido a su gran área superficial.

Por ejemplo, Panecatí-Bernal Y et al. (Bernal et al., 2015) reportó que el capacitor MIS (metal-aislante-semiconductor) con el material MCM-41 puede

tener altos valores de capacitancia aproximadamente $1 \mu\text{Fcm}^{-2}$ a 100 Hz siendo prominente para el desarrollo de sensores o biosensores.

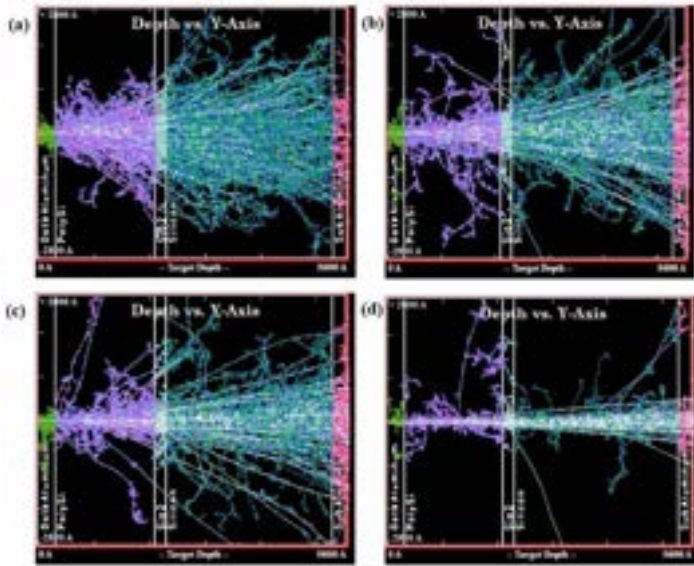


Figura 4. Ejemplo de aplicación de un sensor de radiación con estructura de capacitor MOS. (Anjankar & Dhavse, 2024) <https://doi.org/10.1007/s13369-023-08673-0>

Dispositivos Neuromórficos.

Un dispositivo neuromórfico trata de imitar el comportamiento del funcionamiento del cerebro humano, a través de la forma en que las neuronas y sinapsis procesan información (Cao et al., 2025). La base de estos dispositivos neuromórficos son los dispositivos memristores especialmente en la imitación de las sinapsis artificiales, permitiendo aprendizaje, adaptación y procesamiento eficiente (S. Chen et al., 2023) ver Figura 5.

Los dispositivos memristores son importantes para diversas aplicaciones en computación neuromórfica, almacenamiento de datos, seguridad y criptografía, eficiencia energética y otros campos (Lanza et al., 2025). La estructura de un dispositi-

tivo memristor típicamente está conformada por metal-aislante-metal (metal-insulator-metal-MIM) como es mostrado en la Figura 6 (a), (Omar et al., 2023). Por ejemplo, el electrodo superior puede ser de titanio, la capa activa puede ser un óxido semiconductor resistivo como el óxido de hafnio, y el electrodo inferior puede ser de ITO (óxido de indio-estaño), que es un material conductor (Kim et al., 2024) ver Figura 6 (b). Esta configuración de óxido de hafnio es de un memristor de memoria no volátil, es decir que retiene datos sin energía. Debido a que el óxido de hafnio permite la formación y ruptura de filamentos conductores cuando se aplican pulsos eléctricos, generando estados de alta y baja resistencia eléctrica (Swathi & Angappane, 2022).

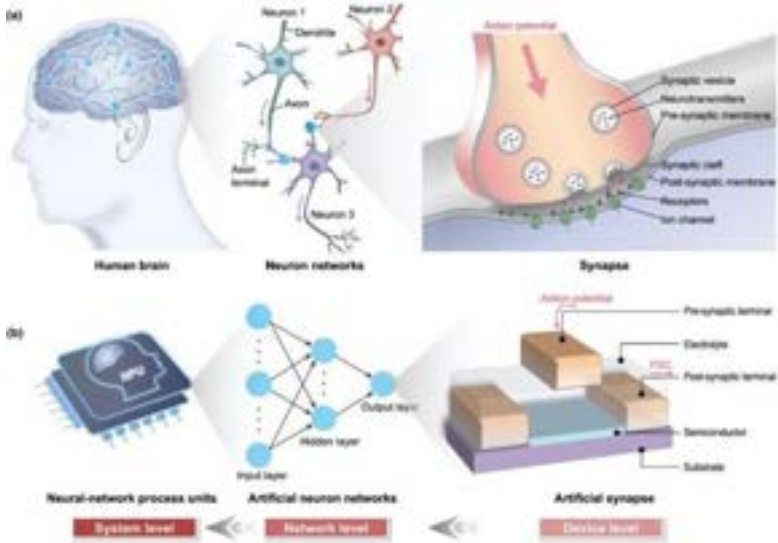


Figura 5. Comparación del sistema nervioso humano y un dispositivo neuromórfico bioinspirado. (Yu et al., 2022) <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2022.09.012>

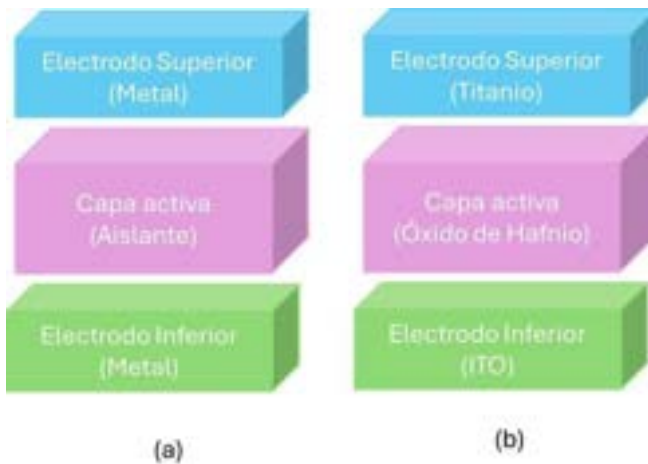


Figura 6. Representación esquemática de la estructura tradicional de un memristor (a) y ejemplo de la estructura memristor (b). Fuente propia.

Existe una gama de materiales que pueden ser usados para el desarrollo de dispositivos memristor como los haluros de perovskitas (Pérez-Martínez et al., 2024), , materiales en 2D como sulfuro de molibdeno (MoS_2), seleniuro de cobre (Cu_2Se), semiconductores como óxido de zinc (ZnO), óxido de titanio (TiO_2), óxido de níquel (NiO), materiales compuestos como óxido de galio dopado con estaño, óxido de aluminio dopado con hafnio, nanoestructuras de carbono como óxido de grafeno, nanotubos de carbono, ferroeléctricos como titanato de bario (BaTiO_3), nitruro de aluminio (AlN), materiales poliméricos como PEDOT:PPS, PMMA entre otros (Gou et al., 2024).

Considero que el área superficial específica es un factor crucial para el desarrollo de los dispositivos memristor, para la conmutación resistiva que es un fenómeno que se relaciona con la migración de iones o la formación de filamentos conductores, que están influenciados por la geometría y el área del dispositivo. Algunos materiales mencionados

anteriormente tienen un área superficial reducida. Por este motivo en este trabajo de investigación se propone al MCM-41 como un material para el desarrollo de dispositivos memristor. Debido a que el MCM-41 tiene una gran área superficial se podrían contar con varios sitios activos para alojar diferentes nanomateriales, por ejemplo, Bravo de Luciano G.M. et al. (Bravo de Luciano et al., 2024) reportó la incorporación de nanopartículas de óxido de hierro en el MCM-41 para el desarrollo de un capacitor MIS, permitiendo una adecuada migración de iones para el fenómeno de conmutación resistiva que está relacionado con los dispositivos neuromórficos. También, Panecatí-Bernal Y. et al. (Panecatí-Bernal et al., 2021) reportó el composite de MCM-41 con nanopartículas de ZnO con una estructura “wrikled”. La Figura 7 muestra una propuesta de una representación esquemática de la estructura del dispositivo memristor usando MCM-41 dopado con óxido de zinc como capa activa, plata como electrodo superior e ITO como electrodo inferior sobre un sustrato de PET.



Figura 7. Representación esquemática de la estructura del dispositivo memristor usando MCM-41.

Fuente propia.

La gran área superficial que presenta el MCM-41 con los nanomateriales incorporados en su interior permitiría mejorar las propiedades resistivas de los dispositivos memristores, siendo esenciales estas propiedades para la sinapsis artificial en redes neuromórficas.

Otro factor importante es que la capa activa del

dispositivo memristor debe de presentar un comportamiento resistivo el MCM-41 es un material aislante y un buen candidato de material resistivo, cumpliendo esta condición. Y podría ser mejorada esta propiedad con la incorporación de nanopartículas semiconductoras como TiO_2 , ZnO , HfO_2 en superficie del material mesoporoso MCM-41.

Láseres

Un láser es un dispositivo que emite luz coherente mediante un proceso de amplificación óptica basado en la emisión estimulada de radiación electromagnética (Bakhtari et al., 2024). Los láseres en el área de internet de las cosas están relacionados con varias aplicaciones como sensores para vehículos autónomos, drones inteligentes, sistemas de seguridad, agricultura de precisión; comunicación óptica en redes IoT de alta velocidad que permiten la transmisión de datos por fibra óptica, fabricación de microcomponentes para chips, diagnóstico y monitoreo (Manie et al., 2022) ver Figura 8.

Los materiales que se usan para la fabricación de láseres con aplicaciones en IoT son nanopartículas semiconductoras como óxido de titanio (TiO_2), seleniuro de galio (GaSe) o metálicas como nanopartículas bimetalicas de oro y plata materiales en 2D como el grafeno o sulfuro de molibdeno (MoS_2), entre otros. También han usado nanocomposites de nanopartículas metálicas con semiconductoras como óxido de titanio dopado con paladio (Pd/TiO_2), sulfuro de molibdeno dopado con plata (Ag/MoS_2) entre otros (Manshina et al., 2024).

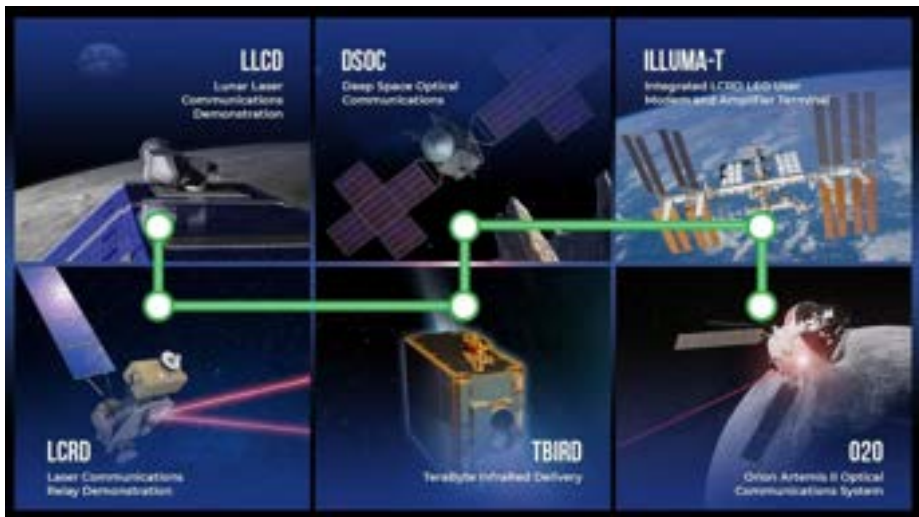


Figura 8. Aplicación de láser en comunicación espacial. De Here's how NASA will test space internet with lasers on ISS, por Rizwan Choudhury, 2023, sitio web de Interesting Engineering (Here's how NASA will test space internet with lasers on ISS) Copyright 2023 por Interesting Engineering.

El material mesoporoso MCM-41 puede servir como soporte para colorantes láser, debido a que permite alojar materiales orgánicos como rodamina o cumarina, estabilizando los colorantes y evitando su degradación térmica. También se pueden incorporar tierras raras como erbio o neodimio para el desarrollo de láseres. Además, es posible incorporar nanopartículas semiconductoras dopadas con metales como Pd/TiO₂. Una ventaja de incorporar los nanomateriales en el MCM-41 es la posibilidad de modificar su comportamiento de emisión para que emitan en diferentes longitudes de onda (Z. Chen et al., 2023).

Integración en la educación Científico-Tecnológica

El presente trabajo menciona la importancia de la aplicación del material mesoporoso MCM-41 en diferentes aplicaciones en el área de tecnologías de la información e innovación digital que están relacionadas con el internet de las cosas (IoT) para el desarrollo de diferentes dispositivos como son: sensores, capacitores MOS, dispositivos neuromórficos. Basado en esto se pueden desarrollar diferentes proyectos de dispositivos innovadores basados en MCM-41 donde se puedan involucrar los conocimientos de diferentes disciplinas STEM como física, química,

matemáticas, electrónica, ciencia de datos, lenguajes de programación básicamente, así como materias relacionadas con IoT donde se pueden involucrar diferentes estudiantes para fomentar el aprendizaje activo en ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas.

Impacto educativo y social.

El impacto educativo que presenta este proyecto es que promueve el aprendizaje activo en áreas STEM, debido a que se pueden desarrollar diferentes proyectos educativos mediante el uso del material MCM-41 para crear dispositivos innovadores con aplicaciones en el internet de las cosas, fomentando tanto la educación tecnológica como la investigación científica.

El impacto social de este proyecto es que el desarrollo de estos proyectos educativos puede ser aplicados en la sociedad en el futuro a través de las aplicaciones de los dispositivos desarrollados en el área de internet de las cosas. También se tendría una contribución a la comunidad científica abriendo nuevas posibilidades del desarrollo de dispositivos relacionados con el internet de las cosas más eficientes. Considerando que el material MCM-41 no ha sido explorado en esta área.

Conclusiones

De acuerdo con el panorama presentado en este trabajo, podemos concluir que el material mesoporoso MCM-41 presenta un gran potencial para el desarrollo de nuevos dispositivos debido a sus propiedades peculiares. Entre las aplicaciones destacan sensores, capacitores MOS y dispositivos

neuromórficos, con perspectivas futuras en el Internet de las Cosas y la promoción del aprendizaje activo STEM en la comunidad escolar. Al mismo tiempo, se abren nuevas oportunidades para el desarrollo de dispositivos innovadores que contribuyen al avance de la comunidad científica.

Declaración de privacidad

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Declaración de no Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de interés alguno.

Descargo de Responsabilidad (Inteligencia Artificial)

Los autores declaran por la presente que NO se han utilizado tecnologías de IA generativa, tales como modelos de lenguaje grandes (ChatGPT, COPILOT, etc.) y generadores de texto a imagen, durante la redacción o edición de este manuscrito.

Los autores se descargan de responsabilidad (INTELIGENCIA ARTIFICIAL).

Agradecimientos

Yesmin Panecatí-Bernal agradece a los coautores de la Universidad Tecnológica de Tecamachalco y Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por sus valiosas aportaciones y colaboración para la realización de este trabajo.

Referencias

- Agudo Cortés, C., Morales Castro, Arturo., & Orduña Trujillo, J. (2024). Las TIC en la Era Digital - 1ra Edición. (1st ed.). Ecoe Ediciones México.
- Anjankar, S. C., & Dhavse, R. (2024). Design and Optimization of MOS Capacitor based Radiation Sensor for Space Applications. *Arabian Journal for Science and Engineering* (2011), 49(5), 7013–7028. <https://doi.org/10.1007/s13369-023-08673-0>
- Bakhtari, A. R., Sezer, H. K., Canyurt, O. E., Eren, O., Shah, M., & Marimuthu, S. (2024). A Review on Laser Beam Shaping Application in Laser-Powder Bed Fusion. In *Advanced Engineering Materials* (Vol. 26, Number 14). <https://doi.org/10.1002/adem.202302013>
- Bernal, Y. P., Alvarado, J., Juárez, R. L., Méndez Rojas, M. Á., de Vasconcelos, E. A., de Azevedo, W. M., Iniesta, S. A., & Cab, J. V. (2019). Synthesis and characterization of MCM-41 powder and its deposition by spin-coating. *Optik (Stuttgart)*, 185, 429–440. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.03.117>
- Bernal, Y. P., Juárez, R. L., De Vasconcelos, E. A., Da Silva, E. F., & De Azevedo, W. M. (2015). Metal-insulator-semiconductor capacitors with water-containing hexagonal mesoporous silica (MCM-41) dielectric and high values of capacitance per unit area. *Semiconductor Science and Technology*, 30(4). <https://doi.org/10.1088/0268-1242/30/4/045003>
- Bravo de Luciano, G. M., Soto-Cruz, B. S., Romero-López, A., Panecatí-Bernal, Y., Luna-López, J. A., & Domínguez-Jiménez, M. Á. (2024). Influence of *Baccharis salicifolia* Extract on Iron Oxide Nanoparticles in MCM-41@IONP and Its Application in Room-Temperature-Fabricated Metal-Insulator-Semiconductor Diodes. *Applied Nano*, 5(2). <https://doi.org/10.3390/appNano5020006>
- Bravo de Luciano, G., Panecatí-Bernal, Y., Soto-Cruz, B., Méndez-Rojas, M. Á., López-Salazar, P., Alcántara-Iniesta, S., Portillo, M. C., Romero-López, A., Mejía-Silva, J., Alvarado, J., & Domínguez-Jiménez, M. Á. (2022). Controlling Size Distribution of Silver Nanoparticles using Natural Reducing Agents in MCM-41@Ag. *ChemistrySelect (Weinheim)*, 7(43), n/a. <https://doi.org/10.1002/slct.20202566>
- Brida, P., Krejcar, O., Selamat, A., & Kertesz, A. (2021). Smart sensor technologies for IoT. In *Sensors* (Vol. 21, Number 17). <https://doi.org/10.3390/s21175890>
- Cao, T., Shen, C., Wang, D., Zhao, H., Tan, R., Zhou, Z., Li, H., Li, B., Zhao, M., & Huang, H. W. (2025). Emerging memory devices for neuromorphic computing in the Internet of Medical Things. In *Cell Reports Physical Science* (Vol. 6, Number 8). <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2025.102735>
- Chen, S., Zhang, T., Tappertzhofen, S., Yang, Y., & Valov, I. (2023). Electrochemical-Memristor-Based Artificial Neurons and Synapses—Fundamentals, Applications, and Challenges. In *Advanced Materials* (Vol. 35, Number 37). <https://doi.org/10.1002/adma.202301924>
- Chen, Z., Wang, Q., He, Z., Li, J., Mei, E., Liang, X., & Xiang, W. (2023). Controlling and optimizing amplified spontaneous emission based on CsPbBr₃@MCM-41 molecular sieve composite. *Journal of Luminescence*, 253. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2022.119411>
- Cheng, H. C., Chen, Po Han, Su, Y. T., & Chen, Po Hung. (2021). A Reconfigurable Capacitive Power Converter with Capacitance Redistribution for Indoor Light-Powered Batteryless Internet-of-Things Devices. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 56(10). <https://doi.org/10.1109/JSSC.2021.3075217>
- De Queiros Souza, G. E., de Andrade Schaffner, R., do Nascimento, C. T., Beraldi Gomes, C. M., Oliveira, L. G., Cerutti, D. L., Freddo, A.,

- Martínez, D. G., & Alves, H. J. (2025). Evaluation of reaction conditions in the dry reforming process using a Ni/MCM-41 catalyst for syngas production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 158, 150503. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.150503>
- Gou, K. Y., Li, Y. R., Song, H. L., Lu, R., & Jiang, J. (2024). Optimization strategy of the emerging memristors: From material preparation to device applications. *In iScience* (Vol. 27, Number 12). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.111327>
- Hachebe, F., Hachemaoui, M., Mokhtar, A., Chikh, K., Benali, F., Mekki, A., Zaoui, F., Cherifi, Z., & Boukoussa, B. (2020). Recent Advances on the Preparation and Catalytic Applications of Metal Complexes Supported-Mesoporous Silica MCM-41 (Review). *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 30(11), 4245–4268. <https://doi.org/10.1007/s10904-020-01689-1>
- Hou, X., Luo, R., Liu, Q., Chi, Y., Zhang, J., Ma, H., Zhang, Q., & Fan, J. (2024). High-temperature time-dependent dielectric breakdown of 4H-SiC MOS capacitors. *Case Studies in Thermal Engineering*, 63. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105371>
- Ju, M., Dou, Z., Li, J. W., Qiu, X., Shen, B., Zhang, D., Yao, F. Z., Gong, W., & Wang, K. (2023). Piezoelectric Materials and Sensors for Structural Health Monitoring: Fundamental Aspects, Current Status, and Future Perspectives. In *Sensors* (Vol. 23, Number 1). <https://doi.org/10.3390/s23010543>
- Kim, T., Lee, D., Chae, M., Kim, K. H., & Kim, H. D. (2024). Enhancing the Resistive Switching Properties of Transparent HfO₂-Based Memristor Devices for Reliable Gasistor Applications. *Sensors*, 24(19). <https://doi.org/10.3390/s24196382>
- Lanza, M., Pazos, S., Aguirre, F., Sebastian, A., Le Gallo, M., Alam, S. M., Ikegawa, S., Yang, J. J., Vianello, E., Chang, M. F., Molas, G., Naveh, I., Ielmini, D., Liu, M., & Roldan, J. B. (2025). The growing memristor industry. *Nature*, 640(8059). <https://doi.org/10.1038/s41586-025-08733-5>
- Manie, Y. C., Yao, C. K., Yeh, T. Y., Teng, Y. C., & Peng, P. C. (2022). Laser-Based Optical Wireless Communications for Internet of Things (IoT) Application. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(23). <https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3190619>
- Manshina, A. A., Tumkin, I. I., Khairullina, E. M., Mizoshiri, M., Ostendorf, A., Kulinich, S. A., Makarov, S., Kuchmizhak, A. A., & Gurevich, E. L. (2024). The Second Laser Revolution in Chemistry: Emerging Laser Technologies for Precise Fabrication of Multifunctional Nanomaterials and Nanostructures. *Advanced Functional Materials*, 34(40), 2405457. <https://doi.org/10.1002/adfm.202405457>
- Martínez-Edo, G., Balmori, A., Pontón, I., Martí del Río, A., & Sánchez-García, D. (2018). Functionalized Ordered Mesoporous Silicas (MCM-41): Synthesis and Applications in Catalysis. *Catalysts*, 8(12), 617. <https://doi.org/10.3390/catal8120617>
- Omar, E., Aly, H., & Fedawy, M. (2023). A Brief introduction to Memristor Device. *International Journal of Advanced Engineering and Business Sciences*, 4(2). <https://doi.org/10.21608/ijaeb.2023.172239.1067>
- Panecatí-Bernal, Y., Alvarado, J., Ortiz-Medina, J., Fuentesilla-Carcamo, I., Lima-Juárez, R., Granada-Ramírez, D. A., Chávez-Portillo, M., Esquina-Arenas, L., Hernández-Corona, S., Alpes de Vasconcelos, E., Mendes de Azevedo, W., Méndez-Rojas, M. Á., Palomino-Ovando, M. A., & Navarro-Morales, E. (2023). Physical and Chemical Interactions of the Polar and Nonpolar Solvents on the Mesoporous Silica Material to Developing Solvent Sensors. *ChemistrySelect*, 8(12). <https://doi.org/10.1002/slct.202204636>
- Panecatí-Bernal, Y., Juárez, R. L., De Vasconcelos, E. A., Chávez Portillo, M., De Azevedo, W. M., Méndez-Rojas, M., ngel, Garrido-Rosado, R., Villanueva-Cab, J., Iniesta, S. A., & Alvarado, J. (2021). A wrinkled

- ZnO/MCM-41 nanocomposite: Hydrothermal synthesis and characterization. *Materials Research Express*, 8(6). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac0c50>
- Pérez-Martínez, J. C., Martín-Martín, D., Arredondo, B., & Romero, B. (2024). Unraveling Conductive Filament Formation in High Performance Halide Perovskite Memristor. *Advanced Electronic Materials*, 10(9). <https://doi.org/10.1002/aelm.202400067>
- Russo, N., Reis, L., Silveira, C., & Mamede, H. S. (2024). Towards a Comprehensive Framework for the Multidisciplinary Evaluation of Organizational Maturity on Business Continuity Program Management: A Systematic Literature Review. *Information Security Journal*, ahead-of-print(ahead-of-print), 1–19. <https://doi.org/10.1080/19393555.2023.2195577>
- Storey, V. C., Yue, W. T., Zhao, J. L., & Lukyanenko, R. (2025). Generative Artificial Intelligence: Evolving Technology, Growing Societal Impact, and Opportunities for Information Systems Research. *Information Systems Frontiers*, 27(5), 2081–2102. <https://doi.org/10.1007/s10796-025-10581-7>
- Swathi, S. P., & Angappane, S. (2022). Enhanced resistive switching performance of hafnium oxide-based devices: Effects of growth and annealing temperatures. *Journal of Alloys and Compounds*, 913. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.165251>
- Torres Manrique, J. Isaac., & Torres Manrique, J. Isaac. (2024). *Evolución y Futuro de Las Tecnologías de la Información y Comunicación*. (1st ed.). J.M. Bosch Editor.
- Yu, J., Wang, Y., Qin, S., Gao, G., Xu, C., Lin Wang, Z., & Sun, Q. (2022). Bioinspired interactive neuromorphic devices. *Materials Today*, 60, 158–182. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2022.09.012>
- Zong, M., Hekmati, A., Guastalla, M., Li, Y., & Krishnamachari, B. (2025). Integrating large language models with internet of things: applications. *Discover Internet of Things*, 5(1), 2–15. <https://doi.org/10.1007/s43926-024-00083-4>

Recepción: 03.02.2026

Revisión: 20.03.2026

Publicación: 08.05.2026

<https://orcid.org/0009-0001-3874-7586>

<https://orcid.org/0000-0002-5494-6972>

EL DIÁLOGO INVISIBLE ENTRE BACTERIAS: DEL QUÓRUM SENSING A LOS BIOFILMS

THE INVISIBLE DIALOGUE BETWEEN BACTERIA: FROM QUORUM SENSING TO BIOFILMS

Alma Cristina Arellano-García ⁽¹⁾;
Nicolas Amaya-Zambrano* ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada (CIBA), Instituto
Politécnico Nacional, Ex-Hacienda San Juan Molino, Carretera Estatal
Tecuexcomac-Tepetitla Km 1.5, Tlaxcala 90700, Mexico

Correos
aarellanog2401@alumno.ipn.mx,
namayz2400@alumno.ipn.mx
2212562699

Resumen

El *quorum sensing* es un mecanismo de comunicación química que permite a los microorganismos coordinar comportamientos colectivos en función de la densidad celular. A través de la producción, liberación y detección de moléculas señal denominadas autoinductores, las poblaciones microbianas activan programas génicos que regulan procesos como la virulencia, la cooperación metabólica y la formación de biofilms. Los biofilms representan una forma de vida comunitaria altamente organizada, en la que las células se encuentran embebidas en una matriz extracelular que les confiere protección y estabilidad frente a condiciones ambientales adversas y agentes antimicrobianos. En este artículo de divulgación científica se explora la relación funcional entre el *quorum sensing* y la formación de biofilms, destacando cómo la comunicación microbiana integra la regulación del metabolismo comunitario, las interacciones sociales y la arquitectura de estas comunidades. Asimismo, se abordan las perspectivas actuales de investigación, incluyendo estrategias de interferencia de la comunicación (*quorum quenching*) y su potencial aplicación en los ámbitos médico, ambiental e industrial. Comprender estos sistemas de comunicación permite ampliar nuestra visión del mundo microbiano, así como identificar nuevas oportunidades para el control y aprovechamiento de comunidades microbianas complejas.

Palabras clave: *quorum sensing, biofilms, comunicación microbiana, cooperación microbiana, quorum quenching.*

Abstract

Quorum sensing is a chemical communication mechanism that enables microorganisms to coordinate collective behaviors in response to cell population density. Through the production, release, and detection of signaling molecules known as autoinducers, microbial populations activate gene expression programs that regulate processes such as virulence, metabolic cooperation, and biofilm formation. Biofilms represent a highly organized communal lifestyle in which cells are embedded in an extracellular matrix that provides protection and stability against environmental stresses and antimicrobial agents. This scientific outreach article examines the functional relationship between quorum sensing and biofilm formation, emphasizing how microbial communication integrates the regulation of community metabolism, social interactions, and biofilm architecture. Current research perspectives are also discussed, including strategies aimed at disrupting microbial communication (*quorum quenching*) and their potential applications in medical, environmental, and industrial contexts. Understanding these communication systems not only broadens our knowledge of microbial life but also opens new avenues for the control and exploitation of complex microbial communities.

Keywords: *quorum sensing, biofilms, microbial communication, microbial cooperation, quorum quenching.*

Introducción

En el mundo microscópico, la cooperación puede ser cuestión de supervivencia. Lejos de ser organismos aislados, las bacterias intercambian información para coordinar sus acciones. Este fenómeno, conocido como *quorum sensing* (QS), les permite “medir” cuántas son, detectar cambios en su entorno y decidir colectivamente cuándo activar genes implicados en procesos como la virulencia, la bioluminiscencia o la formación de biofilms.

Cada célula produce pequeñas moléculas señal llamadas autoinductores, que se acumulan en el medio hasta alcanzar una concentración crítica. Cuando esto ocurre, las bacterias “saben” que hay suficientes vecinas para emprender una acción conjunta; así, la comunidad responde como una sola entidad, capaz de adaptarse y persistir en condiciones adversas. Uno de los escenarios donde el *quorum sensing* adquiere mayor relevancia es la formación de biofilms, una forma de vida de comunidades microbianas adheridas a superficies y embebidas en una matriz extracelular compuesta por polisacáridos, proteínas y ADN. En esta forma de vida colectiva, los microorganismos ganan

estabilidad, capacidad de intercambio y tolerancia intrínseca a los antimicrobianos (figura 1). El vínculo generado por la comunicación en la comunidad resulta entonces evidente: el *quorum sensing* actúa como el sistema regulador que les permite construir, mantener y dispersar los biofilms. Interferir con esta comunicación puede reducir la formación y maduración de la biopelícula e incluso potenciar la eficacia de los antibióticos, una estrategia conocida como quorum quenching (QQ).

Explorar cómo las bacterias se comunican y organizan invita a repensar conceptos más amplios de cooperación, inteligencia colectiva y adaptación biológica. Entender su lenguaje no sólo tiene valor científico: también abre caminos para nuevas estrategias médicas, industriales y ambientales, donde escuchar—o silenciar— las voces del mundo bacteriano puede marcar la diferencia. El objetivo de este artículo es explicar el papel del *quorum sensing* como mecanismo de comunicación microbiana fundamental en la formación, regulación y mantenimiento de biofilms, destacando su importancia en la cooperación bacteriana y en procesos biotecnológicos.

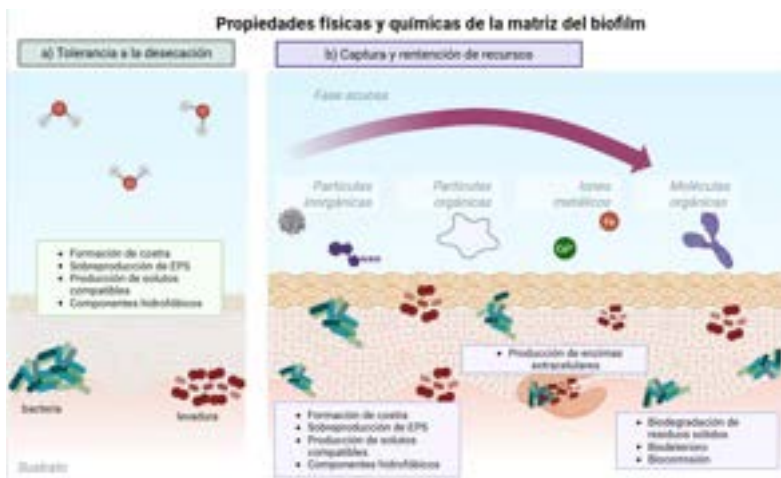


Figura 1. Propiedades fisicoquímicas de la matriz de las biopelículas. Modificada de Flemming et al., 2016.

El lenguaje bacteriano: ¿qué es el quorum sensing?

El QS se basa en la producción, liberación y detección de moléculas señal denominadas autoinductores (AI), las cuales se acumulan en el medio conforme aumenta la cantidad de bacterias. Una vez que la concentración de estas moléculas alcanza un umbral específico, se activa una respuesta coordinada en toda la comunidad. Este sistema regula funciones como la formación de biofilms, la producción de enzimas hidrolíticas, pigmentos, toxinas, factores de virulencia o bioluminiscencia (figura 2) (Abisado et al., 2018).

El quórum sensing se estudia desde 1970 en *Vibrio fischeri* y *Vibrio harveyi*, ambas bacterias producen y responden a la N-acil homoserina lactona (AHL), molécula que al rebasar un nivel inicia

una cascada de traducción que termina en la producción de luciferasa, una enzima involucrada en la bioluminiscencia (Machado et al., 2020).

Aunque los mecanismos de QS difieren entre bacterias Gram negativas y Gram positivas, el principio de comunicación es similar (tabla 1). En las Gram negativas, las señales más comunes son las lactonas de N-acil homoserina (AHLs), que difunden libremente a través de la membrana celular y se unen a receptores citoplasmáticos tipo LuxR para inducir cambios en la transcripción génica (Papenfort & Bassler, 2016). En las Gram positivas, en cambio, la comunicación se realiza mediante péptidos autoinductores que no se difunden libremente y necesitan exportarse (Machado et al., 2020).

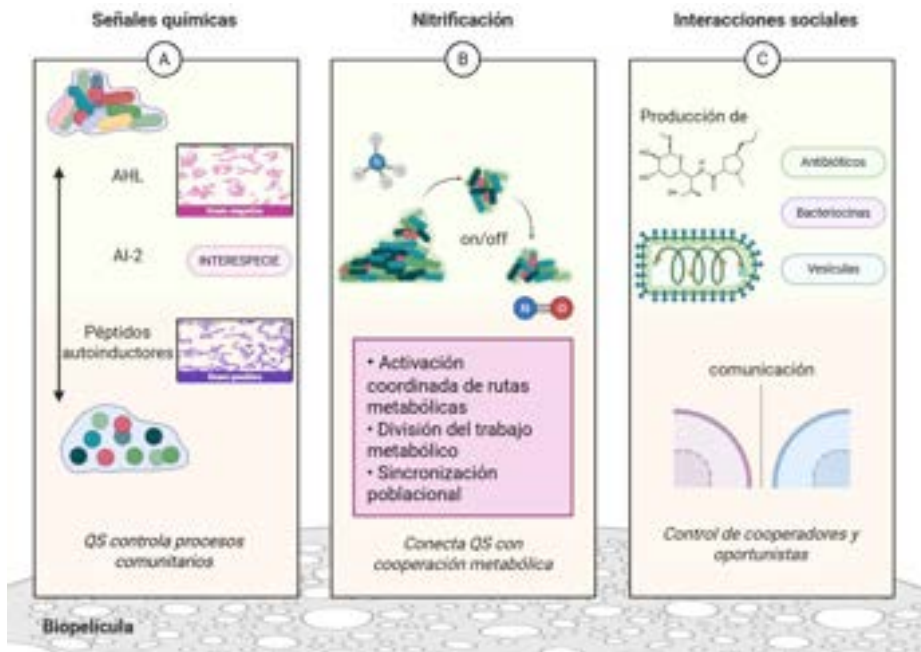


Figura 2. Quorum sensing como integrador de metabolismo, comunicación e interacciones sociales en biofilms. Elaboración propia.

Tabla 1. Tipos de QS y moléculas señal.

Tipo de microorganismo	Molécula señal	Ejemplo de organismo	Función regulada
Bacterias Gram-	AHL (H-SL) Lactona de N acil Homoserina	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Biofilms, virulencia
Bacterias Gram+	Péptidos Autoinductores (AIP)	<i>Staphylococcus aureus</i>	Competencia, toxinas
Multiespecie	Péptido autoinductor AI-2	<i>E. coli</i> y otros	Comunicación interespecie
Hongos	Alcoholes / farnesol	<i>Candida albicans</i>	Morfogénesis, biofilms

En los últimos años, se ha descubierto que el QS no se limita a bacterias individuales o bacterias de una sola especie. Existen sistemas de señalización cruzada que permiten la comunicación entre especies bacterianas e incluso entre distintos dominios biológicos. Por ejemplo, se ha observado que moléculas derivadas del QS bacteriano pueden modular la respuesta inmune del hospedero o influir en la microbiota intestinal y microorganismos eucariotas (Mukherjee & Bash-Sler, 2019). Estos hallazgos han llevado a considerar al QS como un lenguaje químico universal de los ecosistemas microbianos (Kalia et al., 2023).

Un ejemplo de este sistema de comunicación entre especies se encuentra en la placa dental, biofilm que se forma en los dientes y se convierte en sarro dental. La señal AI-2, producida por Gram-positivas y Gram-negativas, desempeña un papel importante en la formación de un biofilm de múltiples especies bacterianas y se ha detectado en seis géneros distintos de bacterias orales. Esta señal tiene relación con la formación de placa dental pues *Porphyromonas gingivalis*, un patógeno dental, puede detectar la señal AI-2 producida por *A. actinomycetemcomitans* (Parashar et al., 2015).

La complejidad de las redes de QS ha sido confirmada por estudios genómicos y de transcriptómica comparativa. En especies como *Pseudomonas aeruginosa*, *Burkholderia cenoce-*

pacia y *Vibrio harveyi*, se han descrito circuitos jerárquicos interconectados, con múltiples sistemas QS que interactúan entre sí para ajustar la respuesta colectiva con precisión. Estos circuitos permiten a las bacterias regular de forma fina la transición entre la vida planctónica (libre) y la vida en comunidad (biofilm), optimizando su adaptación a diferentes nichos ambientales o clínicos (Mukherjee et al., 2023; Fan et al., 2024).

Desde un punto de vista aplicado, comprender el *quorum sensing* ha abierto nuevas rutas para controlar o aprovechar la comunicación bacteriana. En el campo biomédico, los inhibidores de QS o estrategias de *quorum quenching* (QQ) bloquean la señalización para evitar la formación de biofilms e infecciones persistentes, reduciendo la virulencia sin ejercer presión selectiva sobre las bacterias (Kalia et al., 2023; D'Aquila et al., 2024). En contraste, en biotecnología ambiental y alimentaria, el aprovechamiento controlado del QS se explora para estimular consorcios microbianos beneficiosos para la degradación de contaminantes, la producción de enzimas y la fermentación de sustratos complejos (Zhang et al., 2023).

En suma, el QS es un lenguaje molecular de cooperación que transforma la visión clásica de las bacterias como seres aislados. Entender su funcionamiento no solo ilumina los mecanismos que sustentan la organización microbiana, sino que

ofrece herramientas innovadoras para el control, aprovechamiento y diseño de comunidades bacterianas en salud, industria y medio ambiente.

Biofilms: ciudades microbianas

Un biofilm es un hidrogel con ecosistemas complejos formados por una o más especies bacterianas, con 108 a 10¹¹ células por gramo de peso húmedo, ofrece protección ante el estrés ambiental e incrementa su tolerancia a factores externos. La formación de un biofilm bacteriano es un fenómeno complejo determinado por procesos físicos, químicos y biológicos. Este proceso se ha estudiado extensivamente in vitro con variedad de condiciones y microorganismos, y se puede describir como un proceso de cuatro etapas: fijación (en una superficie inanimada o un tejido), crecimiento sésil, maduración y desprendimiento/dispersión (figura 3) (Markowska et al., 2024).

Etapas de fijación y crecimiento sésil: Las fases iniciales involucran la fijación y cohesión reversible del microorganismo a una superficie sólida por interacciones gravitacionales, electrostáti-

cas y fuerzas de Van der Waals o por estructuras bacterianas como el flagelo o pili. A continuación, comienza la unión irreversible de la bacteria a la superficie y la producción de la matriz extracelular. Durante esta fase irreversible las células bacterianas interactúan con la superficie mediante adhesinas y lipopolisacáridos. La intensidad de la unión depende principalmente de las especies, el número de microorganismos que se adhieren a la superficie y de las características fisicoquímicas de la superficie. La velocidad y extensión del crecimiento del biofilm dependen del flujo de líquido, movimiento browniano, disponibilidad de nutrientes y hierro, pH, osmolalidad, concentración de oxígeno, presencia de agentes antimicrobianos y temperatura ambiente.

Etapas de maduración: Esta etapa se asocia al incremento en la densidad celular y reducción del crecimiento de ciertas células donde las interacciones entre los microorganismos y el hospedador son cruciales. La arquitectura de las biopelículas maduras puede variar desde formas planas y homogéneas hasta estructuras organizadas con torres de células encapsuladas y espacios vacíos.

Ciclo de formación de biofilms



Figura 3. Ciclo de formación de biopelículas. Modificada del software Biorender.

Eta de desprendimiento: Para evitar una sobre-población que reduzca el acceso a nutrientes vitales y acumule productos de desecho dañinos, las células bacterianas se desprenden del biofilm y migran como formas planctónicas-libres- (Markowska et al., 2024).

Un biofilm tiene dos capas: la más externa se llama piel y tiene contacto con el exterior, la siguiente es la matriz formada por polisacáridos, celulosa, proteínas, lípidos y ADN extracelular. La piel es una barrera contra la deshidratación, mientras que la matriz tiene diferentes zonas y viscosidades que dan estructura a la película, almacenan agua, nutrientes, iones y ADN; la composición y estructura de la matriz pueden cambiar en el tiempo debido a factores externos e internos.

Tal como en una ciudad conviven personas de origen diferente, en un biofilm coexisten especies bacterianas distintas que forman “barrios” o diferentes hábitats localizados a pequeña escala. Las zonas se pueden diferenciar por la cantidad de oxígeno, que será diferente entre la piel y matriz y determinará el tipo de bacterias que vivan en ellas. Los barrios pueden estar separados por pocos micrómetros (figura 4).

Las estructuras y formación de biofilms son diversas (figura 5), ya que muchas de las bacterias que causan infecciones crónicas relacionadas a biofilms, no están adheridas a una superficie sólida, sino que pueden formarse como agregados o gránulos que flotan en hábitats acuáticos. Modificada de Flemming et al., 2016.

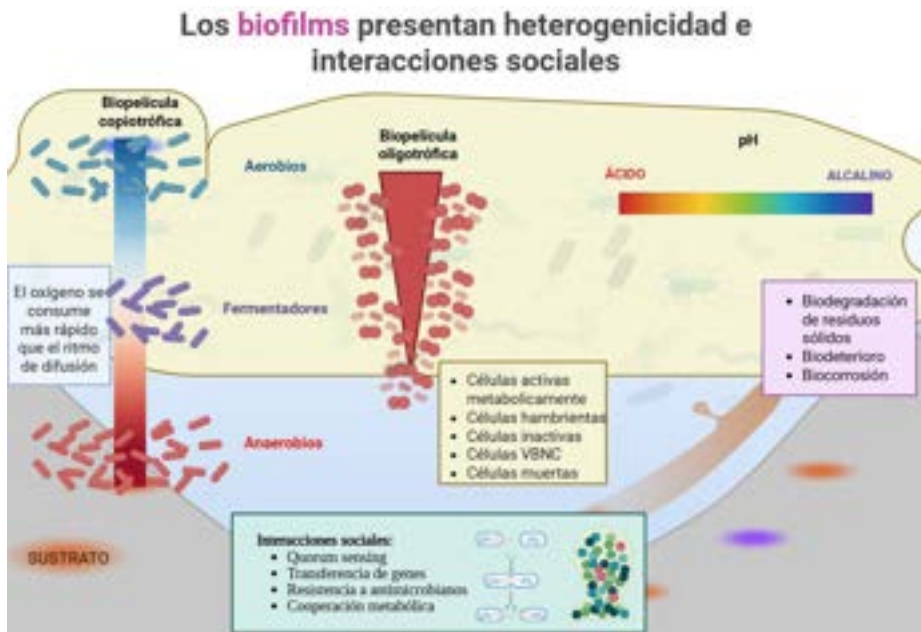


Figura 4. Interacciones entre los microorganismos y el desarrollo de la biopelícula.

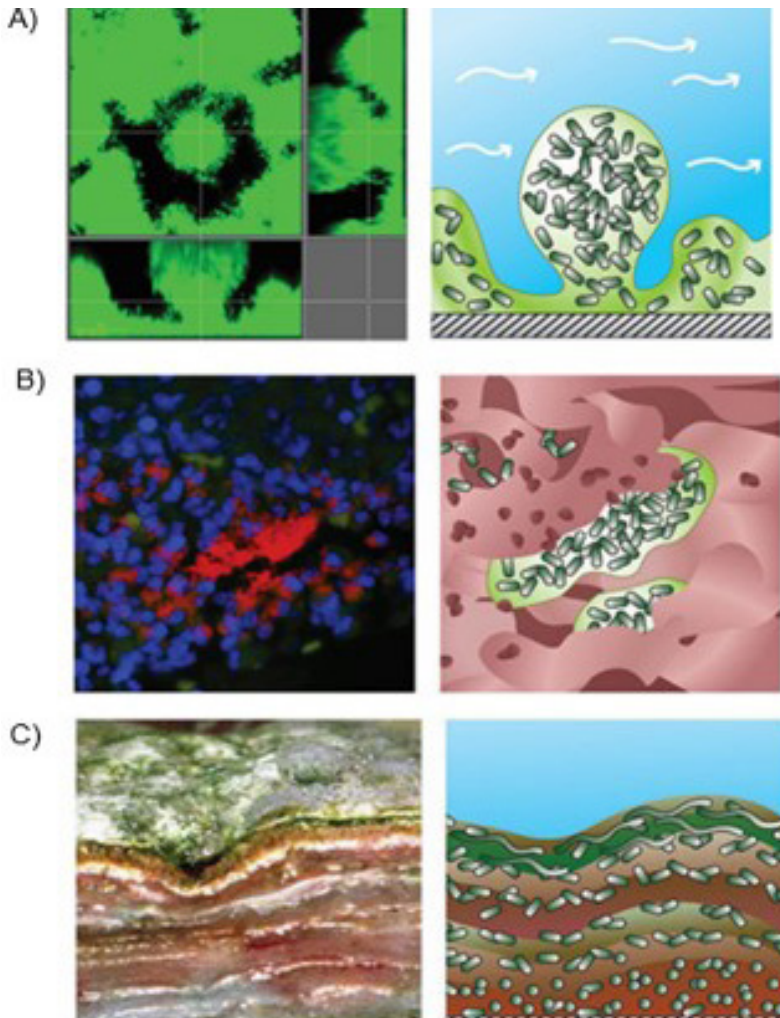


Figura 5. Variedad de estructuras de un biofilm que muestra las diferencias entre biofilms in vivo e in vitro. Las imágenes originales se muestran de lado izquierdo y un dibujo esquemático del lado derecho con el agua en color azul, las células de microorganismos en color verde oscuro, las sustancias poliméricas extracelulares de color verde claro, células hospedadoras y otros materiales como moco o tejido en color rojo y superficies sólidas en color gris rayado. A) Estructura tipo hongo de estudio in vitro de *Pseudomonas aeruginosa* en una célula (Sauer et al., 2022). B) Agregados de *P. aeruginosa* rodeados por leucocitos en tejido de pulmón con fibrosis quística (Kirketerp-Møller et al., 2008). C) Tapete microbiano aislado de un lago en Brasil (Vasconcelos et al., 2006)

Quorum sensing y biofilms

Actualmente la relación entre *quorum sensing* y biofilms se continúa investigando pues si bien están relacionados, no se puede afirmar que el QS controle la formación de biofilms, sin embargo, se ha encontrado evidencia de su influencia en diferentes etapas de desarrollo y funciones del biofilm en diversas especies microbianas (tabla 2), a continuación, se mencionarán algunos ejemplos.

Vibrio cholerae, el patógeno que causa el cólera, utiliza el QS para formar una biopelícula que le permite sobrevivir a condiciones de estrés dentro del huésped y promover la infección en el intestino (Saha et al., 2023). *Staphylococcus aureus* puede generar biofilms en tejidos o dispositivos médicos y provocar una infec-

ción en mamíferos, difícil de tratar por su resistencia a los antibióticos. El sistema de QS de *S. aureus* mediado por el péptido autoinductor (AIP) está involucrado en las etapas de adhesión, maduración y dispersión del biofilm (Peng et al., 2022).

Helicobacter pylori es una bacteria que vive en el tracto gastrointestinal humano y se considera la causa más común de gastritis, úlcera péptica y cáncer gástrico. *H. pylori* forma un biofilm en la superficie de la mucosa gástrica que se relaciona con la señal de lactona de N-acil homoserina de QS que regula varias etapas del desarrollo del biofilm desde la adhesión hasta el desprendimiento de células (Aanniz et al., 2022).

Tabla 2. Relación entre quorum sensing y etapas del biofilm

Etapas del biofilm	Rol del quorum sensing	Resultado biológico
Adhesión inicial	Activación de adhesinas	<i>Fijación a superficie</i>
Maduración	Producción de EPS	Estructura estable
Organización	Regulación metabólica	Cooperación
Dispersión	Represión/activación selectiva	Colonización de nuevos nichos

Perspectivas y aplicaciones

En los últimos años, el estudio del *quorum sensing* (QS) ha adquirido una relevancia creciente al proponerse como una alternativa conceptual al uso tradicional de antibióticos. En lugar de eliminar directamente a los microorganismos, las estrategias basadas en la interferencia de la comunicación microbiana buscan reducir la virulencia, desorganizar los biofilms y hacer a las bacterias más vulnerables a tratamientos convencionales (sensibilizar). Este enfoque, conocido como *quorum quenching* (QQ), ha sido ampliamente revisado en el contexto de infecciones asociadas a biofilms, donde la tolerancia a antimicrobianos representa uno de los principales desafíos clínicos actuales (D'Aquila et al., 2024; Patel et al., 2024).

Una de las aplicaciones más prometedoras del QS y QQ en el ámbito médico es el control de infecciones crónicas asociadas a dispositivos implantables como catéteres, prótesis y válvulas. Investigaciones recientes han demostrado que la combinación de inhibidores de QS con antibióticos puede potenciar la eficacia terapéutica, al debilitar la estructura del biofilm y reducir la expresión coordinada de factores de virulencia (Wang et al., 2024). De forma paralela, se están desarrollando recubrimientos inteligentes para superficies médicas que incorporan propiedades antiadhesivas y anti-QS, con el objetivo de prevenir la colonización microbiana desde las etapas iniciales.

Más allá del contexto clínico, el control del QS tiene aplicaciones relevantes en la industria alimentaria y

en la microbiología ambiental. En plantas de procesamiento de alimentos, los biofilms pueden actuar como reservorios persistentes de microorganismos contaminantes que afectan la seguridad y calidad de los productos. En este escenario, se ha incrementado el interés por inhibidores naturales del QS, derivados de plantas, algas o microorganismos, debido a su bajo impacto toxicológico y su potencial uso como agentes de biocontrol (Shariati et al., 2024). Estrategias similares se exploran en sistemas acuáticos e industriales para reducir la bioincrustación y la biocorrosión.

En contraste con los enfoques orientados a inhibir biofilms, una perspectiva complementaria consiste en aprovechar biofilms funcionales para fines biotecnológicos. La comprensión de cómo el QS regula la cooperación metabólica ha permitido diseñar consorcios microbianos más estables y eficientes, capaces de realizar procesos complejos como la degradación de contaminantes, la depuración de aguas residuales o la producción

de metabolitos de interés industrial. En este contexto, el QS no se interpreta como un blanco terapéutico, sino como una herramienta para optimizar la organización y el rendimiento de comunidades microbianas artificiales (Yang et al., 2023).

Finalmente, el futuro del campo está estrechamente ligado al desarrollo de nuevas metodologías analíticas. El uso integrado de genómica, transcriptómica, metabolómica, microscopía avanzada e inteligencia artificial está permitiendo mapear con mayor precisión las redes de comunicación y las interacciones espaciales en los biofilms. Estos enfoques están transformando el estudio del QS desde una visión simplificada hacia una comprensión más sistémica, reconociendo la comunicación microbiana como un componente central de la adaptación, la persistencia y la evolución de las comunidades microbianas (Liu et al., 2024; Nguyen et al., 2025).

Conclusiones

El QS ha revelado que la vida microbiana está lejos de ser un conjunto de acciones aisladas. A través de señales químicas simples, los microorganismos son capaces de coordinar comportamientos colectivos que les permiten adaptarse, persistir y prosperar en entornos cambiantes. Entre estas estrategias, la formación de biofilms destaca como una de las más eficaces, al ofrecer protección, estabilidad y ventajas evolutivas frente a condiciones adversas.

Comprender la comunicación microbiana y su relación con la vida en comunidad ha permitido explicar fenómenos clave en salud, industria y medio ambiente, desde infecciones persistentes hasta procesos bio-

tecnológicos controlados. Más aún, este conocimiento ha impulsado nuevas formas de intervención que no buscan eliminar a los microorganismos, sino modular su comportamiento, abriendo el camino a estrategias más sostenibles y menos propensas a generar resistencia.

El estudio del quorum sensing y biofilms invita a replantear nuestra visión de los microorganismos: no como entidades simples, sino como sistemas cooperativos altamente organizados. Escuchar y comprender su lenguaje químico amplía las fronteras de la microbiología y ofrece herramientas valiosas para enfrentar algunos de los retos científicos y tecnológicos más urgentes de nuestro tiempo.

Conflicto de interés

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

Declaración de privacidad

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Referencias

- Aanniz, T., Bakri, W., El Mazouri, S., Wakrim, H., Kandoussi, I., Belyamani, L., Ouadghiri, M., & Ibrahim, A. (2022). Biofilm and Quorum Sensing in *Helicobacter pylori*. En T. Das (Ed.), *Focus on Bacterial Biofilms*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.104568>
- Coolahan, M., Browne, H. P., & Cotter, P. D. (2025). Quorum sensing-mediated interactions between bacteria and eukaryotes in marine systems. *Communications Biology*, 8, Article 112. <https://doi.org/10.1038/s42003-025-XXXX-X>
- Costerton, J. W., Stewart, P. S., & Greenberg, E. P. (1999). Bacterial biofilms: A common cause of persistent infections. *Science*, 284(5418), 1318–1322. <https://doi.org/10.1126/science.284.5418.1318>
- D'Aquila, P., Giordano, G., & Bellavia, D. (2024). Quorum quenching approaches against bacterial biofilm infections. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 14, 1298476. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2024.1298476>
- Donlan, R. M. (2001). Biofilms and device-associated infections. *Emerging Infectious Diseases*, 7(2), 277–281. <https://doi.org/10.3201/eid0702.010226>
- Flemming, H.-C., & Wingender, J. (2010). The biofilm matrix. *Nature Reviews Microbiology*, 8(9), 623–633. <https://doi.org/10.1038/nrmicro2415>
- Flemming, H.-C., Wingender, J., Szewzyk, U. et al. (2016). Biofilms: an emergent form of bacterial life. *Nat Rev Microbiol* 14, 563–575 (2016). <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2016.94>
- Fuqua, C., Winans, S. C., & Greenberg, E. P. (1994). Quorum sensing in bacteria: The LuxR–LuxI family of cell density-responsive transcriptional regulators. *Journal of Bacteriology*, 176(2), 269–275. <https://doi.org/10.1128/jb.176.2.269-275.1994>
- Kalia, V. C. (2013). Quorum sensing inhibitors: An overview. *Biotechnology Advances*, 31(2), 224–245. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.10.004>
- Liu, H.-Y., Li, X., & Chen, J. (2024). Mechanisms of antimicrobial resistance in biofilms. *Nature Reviews Bioengineering*, 2, 45–61. <https://doi.org/10.1038/s44222-023-000XX-X>
- Machado, I., Silva, L., Giaouris, E., Melo, L., & Simões, M. (2020). Quorum sensing in food spoilage and natural-based strategies for its inhibition. *Food Res Int.*, 127. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108754>
- Markowska, K., Szymanek-Majchrzak, K., Pituch, H., & Majewska, A. (2024). Understanding Quorum-Sensing and Biofilm Forming in Anaerobic Bacterial Communities. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(23), 12808. <https://doi.org/10.3390/ijms252312808>
- Miller, M. B., & Bassler, B. L. (2001). Quorum sensing in bacteria. *Annual Review of Microbiology*, 55, 165–199. <https://doi.org/10.1146/annurev.micro.55.1.165>
- Nguyen, D., Singh, P. K., & Bassler, B. L. (2025). Quorum sensing: Not just a bridge between bacteria. *Microorganisms*, 13(1), 102. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13010102>
- Papenfort, K., & Bassler, B. L. (2016). Quorum sensing signal-response systems in Gram-negative bacteria. *Nature Reviews Microbiology*, 14(9), 576–588. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2016.89>
- Parashar, A., Parashar, S., Zingade, A., Gupta, S., & Sanikop, S. (2015). Interspecies communication in oral biofilm: An ocean of information. *Oral Science International*, 12(2), 37–42. [https://doi.org/10.1016/S1348-8643\(15\)00016-6](https://doi.org/10.1016/S1348-8643(15)00016-6)

- Parsek, M. R., & Greenberg, E. P. (2005). Sociomicrobiology: The connections between quorum sensing and biofilms. *Trends in Microbiology*, 13(1), 27–33. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2004.11.007>
- Patel, K., Gupta, R., & Sharma, A. (2024). Combatting antibiotic resistance by exploring the promise of quorum quenching. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 170, 115503. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2023.115503>
- Peng, Q., Tang, X., Dong, W., Sun, N., & Yuan, W. (2022). A Review of Biofilm Formation of *Staphylococcus aureus* and Its Regulation Mechanism. *Antibiotics*, 12(1), 12. <https://doi.org/10.3390/antibiotics12010012>
- Saha, S., Aggarwal, S., & Singh, D. V. (2023). Attenuation of quorum sensing system and virulence in *Vibrio cholerae* by phytomolecules. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1133569. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1133569>
- Shariati, A., Azimi, T., & Ardebili, A. (2024). Natural compounds targeting quorum sensing and biofilm formation. *Frontiers in Pharmacology*, 15, 1342219. <https://doi.org/10.3389/fphar.2024.1342219>
- Wang, J., Liu, Y., & Zhang, X. (2024). Quorum-quenching enzymes combined with antibiotics against bacterial biofilms. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 14, 1301184. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2024.1301184>
- Yang, S., Wu, Y., & Chen, Y. (2023). Biofilm tolerance, resistance and infections: Increasing challenges. *Microbial Cell*, 10(6), 145–158. <https://doi.org/10.15698/mic2023.06.789>

Recepción: 20.03.2026

Revisión: 25.03.2026

Publicación: 08.05.2026

<https://orcid.org/0009-0001-6251-6550>

<https://orcid.org/0000-0003-4152-0953>

<https://orcid.org/0000-0002-4745-5868>

<https://orcid.org/0000-0003-1682-4509>

<https://orcid.org/0000-0002-0752-6713>

<https://orcid.org/0000-0003-0525-6155>

DE MINERALES A INSTRUMENTOS QUIRÚRGICOS QUE SALVAN VIDAS

FROM MINERALS TO SURGICAL INSTRUMENTS THAT SAVE LIVES

Nicole Olivares-Likhanova¹

Natalya V. Likhanova²

Janette Arriola-Morales³

Irina Lijanova⁴

Maribel Castillo-Morales³

Octavio Olivares-Xometl^{3*}

(1) Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Medicina,
C. 13 Sur 2702, Col. Los Volcanes, Puebla 72420, México.

(2) Instituto Mexicano del Petróleo, Eje Central Norte Lázaro Cárdenas
No. 152, Col. San Bartolo Atepehuacan, G. A. Madero, CDMX 07730,
México.

(3) Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ingeniería
Química, Av. San Claudio y 18 Sur, Ciudad Universitaria, Col. San Manuel,
Puebla 72570, México.

(4) Instituto Politécnico Nacional, Centro de Innovación e Investigación
Tecnológica, Cerrada Cecati S/N, Colonia Santa Catarina de
Azcapotzalco, CDMX 02250, México.

Correos:

nnicolelikhanova@gmail.com nvictoro@imp.mx

janette.arriola@correo.buap.mx irinalijanova@yahoo.com.mx maribel.castillo@correo.buap.mx

octavio.olivaresx@correo.buap.mx

octavio.olivares@viep.com.mx

Resumen

Desde los inicios de la historia, el hombre comprendió la relevancia del uso de herramientas que pudieran asegurar su supervivencia ante entornos hostiles y como medio de curación. La historia es clara, tuvieron que desarrollar conocimientos acerca de los materiales que poseían en su entorno, seguidos de su transformación en una herramienta útil. Este logro como civilización fue clave con las bases más antiguas de la metalurgia (eras del Bronce y del Hierro), donde los minerales tuvieron un papel importante para la obtención de herramientas con mejores propiedades que las hechas a partir de piedra. Hoy día el avance tecnológico en el procesamiento de minerales de hierro, ha permitido el desarrollo de aleaciones de acero con mejores propiedades físicas y químicas. Las aleaciones de acero inoxidable tienen una amplia gama de aplicaciones porque son resistentes a entornos acuosos más agresivos y a esfuerzos mecánicos. A medida que la ciencia comprendió las propiedades de las aleaciones de acero inoxidable, estos materiales fueron ganando terreno en diferentes áreas, como la médica. Donde el uso de instrumental quirúrgico y piezas especiales exige los máximos estándares de calidad en durabilidad, higiene y seguridad al no interactuar con fluidos corporales y liberar sustancias tóxicas. Todos estos logros son posibles a partir del uso de un simple mineral que hoy en día nos hace la vida más fácil.

Palabras clave: *Mineral; Hierro, Acero inoxidable; Instrumental quirúrgico*

Abstract

From the beginning of history on this planet, humans understood the importance of using tools that could guarantee their survival in hostile environments and as a means of healing. In this context, history is clear: humans had to acquire knowledge about the materials they had at hand, followed by their transformation into useful tools. This civilization achievement was key to setting the most ancient basis of metallurgy (Bronze and Iron Ages), where minerals played a key role in the production of tools with better properties than those displayed by those made of stone. Nowadays, the technological advancement in the processing of iron minerals has enabled the development of steel alloys with improved physical and chemical properties. In the case of stainless-steel alloys, they have been the subject of numerous applications because of their capacity to withstand aggressive media and mechanical stress. As science understood the properties of stainless-steel alloys, these materials gained terrain in different areas, such as the medical field, where surgical instruments and special pieces must comply with the highest quality standards in terms of durability, hygiene, and safety that prevent them from interacting with body fluids and releasing toxic substances. All these achievements have been possible from the discovery, study, and use of a simple mineral that currently makes human life easier

Keywords: *Mineral; Iron; Stainless steel; Surgical instrument*

Introducción

Generalidades de la importancia del hierro

La comodidad actual del ser humano estuvo marcada por eventos importantes en la historia de nuestra civilización, pasando por diferentes periodos. Uno de ellos fue la Edad de Piedra, que duró aproximadamente 2,5 millones de años, caracterizada por la habilidad de desarrollar las primeras herramientas y armas a partir de la correcta identificación de las propiedades de las piedras disponibles (Figura 1) (Hervé et al., 2025; Kiss, 2016; Schmid et al., 2026)

& Day, 2020). Por ejemplo, la egipcia, cuyos vestigios arqueológicos han evidenciado que, aunque fueron maestros en el uso de metales nativos puros (Klemm, Klemm, & Murr, 2001), el uso del hierro no fue ajeno para ellos, pues se localiza en piezas ornamentales en forma de placas en envolturas mortuorias, en utensilios

quirúrgicos empleados en el área de la medicina y en el arte de la momificación. Una de las piezas de gran belleza y llena de misticismo es la daga de Tutankamón, pieza hecha de hierro y adornada con incrustaciones de gran belleza como se observa en la Figura 3 (Comelli et al., 2016).



Figura 3. Daga de hierro del rey Tutankamón (Comelli et al., 2016).

En este contexto, la civilización china tuvo excelentes maestros conocedores de hierro y sus propiedades, lo que les permitió la elaboración de herramientas con este metal para diferentes aplicaciones. Este gran conocimiento estuvo ligado al desarrollo del poderío militar, económico y agrícola del país (Eng, 2016; Li et al., 2025). Sin embargo, se cree que la India en el año 500 a.C. inicia la producción real del acero, con materiales metálicos con propiedades superiores al hierro, un ejemplo es el acero de Damasco, que hoy en

día sigue maravillando. Muchas civilizaciones florecieron gracias al acero y tuvieron una hegemonía como el Imperio Romano, que también mostró avances importantes en la producción masiva de acero, marcando un hito importante en áreas como la militar, la arquitectónica, la médica, etc. Esto permite imaginar cómo el conocimiento de un simple mineral hasta la complejidad en su fundición, refinación y producción a escala industrial (Figura 4), ha permitido el desarrollo de materiales de acero más avanzados (aleaciones).



Figura 4. Diagrama esquemático de la obtención del acero y aleaciones. (Elaboración propia)

Minerales para la obtención del hierro

A pesar del avance en nuevos materiales, es importante destacar que actualmente más del 80% de todas las materias primas, que se utilizan para obtener un producto útil en los sectores industriales como metalúrgico, químico, farmacéutico, cosmético, entre otros, son de origen mineral. En el caso concreto el hierro, es el cuarto elemento más abundante en la tierra (32.07% de la masa de la tierra), su abundancia elemental varía entre aproximadamente el 5% de la corteza terrestre y hasta el 80% del núcleo del planeta (Morgan y Anders, 1980). A pesar de ello, no está en estado puro, localizándose principalmente en minerales con estados de oxidación 2+ y 3+. La lista y clasificación de minerales de hierro es extensa, siendo los más importantes la magnetita (Fe_3O_4), la hematita (Fe_2O_3), la goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$) y la siderita (FeCO_3), como se observan en la Figura 5 (Olmo de Sevilla M., 2016).

De estos minerales, la magnetita y la hematita son las más empleadas para la producción de hierro metálico. Antes de la obtención del hierro, estos minerales pasan por una cadena de operaciones donde son separados de otros contaminantes, cargados en hornos (alto horno) obteniendo el hierro de primera fusión, posteriormente refinados (proceso básico al oxígeno, arco eléctrico) y aleados (acero) como se muestra en la Figura 4. Este acero se usará finalmente en la fabricación de una amplia variedad de materiales metálicos que son cotidianos en nuestra vida.

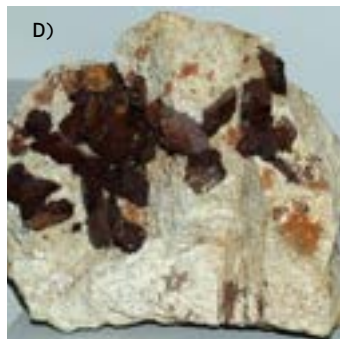
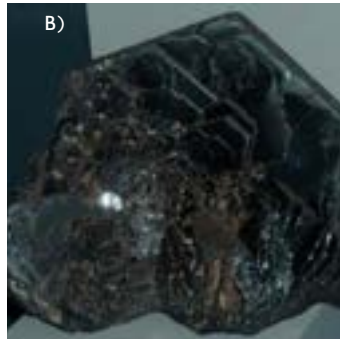


Figura 5. Minerales más relevantes para la producción de hierro: a) magnetita, b) hematita, c) goethita y d) siderita. (M. Olmo, 19 de marzo de 2016)

Desarrollo de aleaciones para instrumentos quirúrgicos.

Con base en los antecedentes históricos, es importante comprender que en todas las culturas del mundo la salud ha tenido un papel importante. Todas estas culturas fueron conocedoras del poder curativo de

las plantas, así como el conocimiento y habilidad en el uso de materiales quirúrgicos empleados en cirugías que representaban la diferencia entre la vida y la muerte (Figura 6).

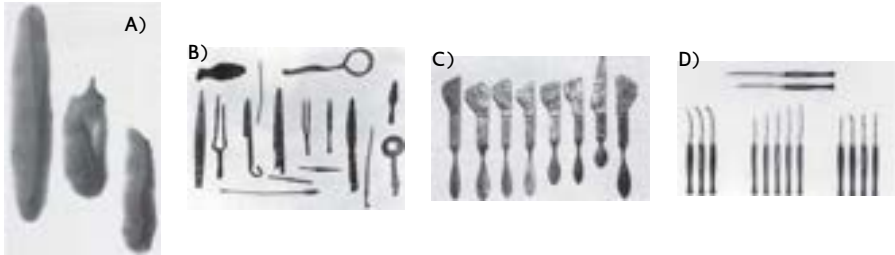


Figura 6. Evolución de instrumentos quirúrgicos: a) herramienta cortante de piedra de hace 30.000-40.000 años, b) instrumentos quirúrgicos griegos (500 a.C.), c) escalpelos romanos (siglo I d.C.) y d) instrumentos de corte del siglo XIX (De la Garza V. L., 2008).

A diferencia de los instrumentos que fueron usados en la antigüedad y que muchos siguen teniendo las mismas funciones. Siendo los siglos XVIII y XIX un período de avance en los instrumentos quirúrgicos debido al uso del acero. Pero a finales del siglo XIX y principios del XX el avance fue mayor, debido a una mayor comprensión del proceso de aleado de aceros que no representan riesgos para la salud del ser humano, ante entornos

altamente corrosivos, como sangre, fluidos corporales, soluciones salinas, soluciones de limpieza y métodos de esterilización, donde el acero inoxidable fue la clave de ese logro. Este material permitió la fabricación de instrumentos resistentes a la corrosión, duros, precisos y fáciles de limpiar. Además de ser fáciles de esterilizar, funcionales y de minimizar el trauma tisular durante la cirugía (Figura 7).



Figura 7. Instrumentos quirúrgicos de acero inoxidable para bisección. (Elaboración propia)

A pesar del avance significativo en el desarrollo de nuevos materiales que están innovando los instrumentos quirúrgicos, la gran mayoría aún se fabrican con acero inoxidable, siendo su origen un mineral en forma de óxido. Entendiendo que un acero inoxidable es una combinación de carbono, cromo, hierro y otros metales llamada aleación. Por ello, estos se clasifican en función de los distintos elementos y cantidades relativas de cada uno de ellos presentes en la matriz de hierro. De forma general se con-

sideran cuatro familias básicas de aceros inoxidables: martensíticos, ferríticos, austeníticos y dúplex. De estas familias los más empleados en la fabricación de instrumental quirúrgico son la serie 300 que pertenece a la familia de los austeníticos (Cr >16-26 %, Ni: 6-30% y C<0.08%), serie 400 ferríticos (C<0,10%; Cr 16-18%) y martensíticos (C: 0.10 % y Cr: 12-14 %). La Figura 8 muestra la forma de la microestructura de estas aleaciones, así como el tipo de arreglo atómico que poseen (Lindner, 2024).

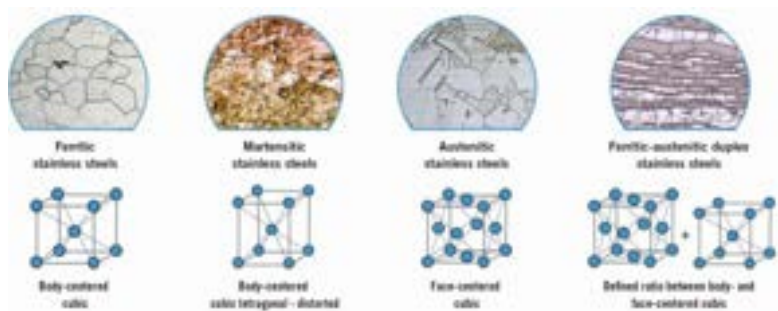


Figura 8. Características típicas de los aceros inoxidables y sus respectivas estructuras cristalinas (Lindner, 2024).

De esta clasificación de aceros inoxidables, las series 300 y 400 son las más empleadas para fines quirúrgicos, como se observa en la Tabla 1 y Figura 9. Esto hace reflexionar que la próxima vez que observemos el uso de

instrumentos quirúrgicos, imaginemos que su origen fue un simple mineral que nuestros antepasados conocieron y que hoy en día, se tiene una tecnología más novedosa para elaborar instrumentos cada vez más complejos.

Tabla 1. Tipo de acero inoxidable comúnmente empleado en materiales quirúrgicos. (elaboración propia)

Tipo AISI*	Familia	Características Principales	Aplicación Quirúrgica
316L	Austenítico	Excelente resistencia a la corrosión, biocompatible	Implantes, instrumental quirúrgico de alta calidad
304	Austenítico	Alta resistencia a la corrosión, buena formabilidad	Instrumental general, bandejas, mangos de bisturí
420	Martensítico	Alta dureza, magnético, resistente al desgaste	Tijeras, bisturís, pinzas de corte
410	Martensítico	Buena resistencia y ductilidad	Pinzas, separadores, instrumental de uso general
440	Martensítico	Máxima dureza (cuchillería)	Puntas de tijeras, instrumentos de microcirugía

*American Iron and Steel Institute



Figura 9. Instrumental quirúrgico de acero inoxidable series 300 y 400.
(Elaboración propia)

Conclusiones

A medida que el conocimiento sobre el uso de los minerales fue ganando terreno para la obtención de hierro y sus respectivas aleaciones de uso médico, es importante recordar que hubo un tiempo en el que los pacientes morían a causa de complicaciones por sus heridas debido al uso de instrumentos que no ofrecían las condiciones de seguridad e higiene. Con el avance e innovación en la ciencia de los materiales, las propiedades de las aleaciones de acero inoxidable de uso quirúrgico han representado menos riesgos para la salud del ser humano, además de prolongar la calidad de vida. Debido a ello, el hierro puede ser considerado como el producto de mayor trascendencia histórica, social y económica de los últimos tres milenios.

Conflicto de intereses

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún conflicto de interés. Los autores participantes en la elaboración de este artículo manifestamos no tener ningún conflicto de interés personal o económico.

Declaración de privacidad

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Los autores se descargan de responsabilidad (INTELIGENCIA ARTIFICIAL). Los autores declaran por la presente que NO se han utilizado tecnologías de IA generativa, tales como modelos de lenguaje grandes (ChatGPT, COPILOT, etc.) y generadores de texto a imagen, durante la redacción o edición de este manuscrito

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de la correspondencia. Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Agradecimientos

Todos los autores agradecen el apoyo a la VIEP-BUAP por el apoyo otorgado al proyecto ID Proyecto: 00354-PV/2024.

Referencias

- Comelli, D., D'Orazio, M., Folco, L., El-Halwagy, M., Frizzi, T., Alberti, R., Valentini, G. (2016). The meteoritic origin of Tutankhamun's iron dagger blade. *Meteoritics & Planetary Science*, 51. doi:10.1111/maps.12664
- Cuesta-Aguirre, D. R., Campoy-Caballero, M. R., Sandoval-Ávila, C., Busquets i Costa, C., Fàbregas i Espadaler, M., Sinner, A. G., Santos, C. (2025). Mitochondrial DNA diversity in northeast Iberians during the Iron Age. *Journal of Archaeological Science*, 183, 106390. doi:https://doi.org/10.1016/j.jas.2025.106390
- De la Garza V. L. (2008). Bisturíes, agujas y suturas: La evolución del material básico de la cirugía. *Cir Gen*, 30(4), 224-230.
- Eng, J. T. (2016). A bioarchaeological study of osteoarthritis among populations of northern China and Mongolia during the Bronze Age to Iron Age transition to nomadic pastoralism. *Quaternary International*, 405, 172-185. doi:https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.07.072
- Erb-Satullo, N. L., Gilmour, B. J. J., & Khakhutaishvili, N. (2014). Late Bronze and Early Iron Age copper smelting technologies in the South Caucasus: the view from ancient Colchis c. 1500–600 BC. *Journal of Archaeological Science*, 49, 147-159. doi:https://doi.org/10.1016/j.jas.2014.03.034
- Erb-Satullo, N. L., Gilmour, B. J. J., & Khakhutaishvili, N. (2020). The metal behind the myths: iron metallurgy in the south-eastern Black Sea region. *Antiquity*, 94(374), 401-419. doi:10.15184/aqy.2020.16
- Erb-Satullo, N. L., & Klymchuk, B. W. (2025). Iron in copper metallurgy at the dawn of the Iron Age: Insights on iron invention from a mining and smelting site in the Caucasus. *Journal of Archaeological Science*, 183, 106338. doi:https://doi.org/10.1016/j.jas.2025.106338
- Hervé, G., Marmara, M., Chauvin, A., Vaschalde, C., Martin-Kobierzyki, E., Brossier, B., & Demory, F. (2025). How long were alignments of heating stones hearths used during the Early Iron Age in Western Europe? Evidence of a long chronology by archaeomagnetic dating at Saint-Maximin-la-Sainte-Baume (Southern France). *Journal of Archaeological Science: Reports*, 66, 105241. doi:https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2025.105241
- Kiss, T. (2016). Edad de Piedra. *Enciclopedia Humanidades* (Recuperado el 17 de marzo de 2026). Retrieved from https://humanidades.com/edad-de-piedra/
- Klemm, D., Klemm, R., & Murr, A. (2001). Gold of the Pharaohs – 6000 years of gold mining in Egypt and Nubia. *Journal of African Earth Sciences*, 33(3), 643-659. doi:https://doi.org/10.1016/S0899-5362(01)00094-X
- Li, B., Li, T., Li, P., Wu, Y., Chen, W., She, J., Liu, C. (2025). Foxtail agricultural development and organic fertilizer for farmland management in the central region of the North China plain during the Bronze Age and Iron Age. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 63, 105082. doi:https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2025.105082
- Lindner, S. (2024). CO2 Reduction Potential of Sustainable Stainless Steel. *MTZ worldwide*, 85(9), 48-53. https://doi.org/10.1007/s38313-024-1954-9
- Liss, B., Levy, T. E., & Day, J. M. D. (2020). Origin of iron production in the Eastern Mediterranean: Osmium isotope and highly siderophile element evidence from Iron Age Jordan. *Journal of Archaeological Science*, 122, 105227. doi:https://doi.org/10.1016/j.jas.2020.105227
- Olmo de Sevilla, M. (2016). Minerales (Recuperado 19 de marzo de 2026). http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Geophysics/mineral.html#c1
- Sabatini, S., Nordvall, L., Nowak, K., Stos-Gale, Z., Oudbashi, O., Sobieraj, J., Wranning, P. (2025). Iron age metal trade between the Atlantic and the Baltic Sea: new insights from the first complete plano-convex ingot found in Sweden and ingot rods from the Ilawa Lakeland in northeastern Poland. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 66, 105312. doi:https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2025.105312
- Schmid, V. C., Sifogeorgaki, I., Abruzzese, T., Blik, S., Huang, L., & Dusseldorp, G. L. (2026). Wind(ow) of change: The end of the Middle Stone Age and the beginning of the Later Stone Age at Umhlatuzana rockshelter showcasing concurrent technological and techno-economic shifts. *Quaternary Science Reviews*, 377, 109806. doi:https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2026.109806
- Wikimedia, (2010). Recuperado el 19 March 2026. https://es.wikipedia.org/wiki/Raspador

Recepción: 02.03.2026

Revisión: 25.03.2026

Publicación: 08.05.2026

<https://orcid.org/0009-0001-9098-866X>

<https://orcid.org/0000-0003-1716-7707>

<https://orcid.org/0000-0002-9410-5852>

<https://orcid.org/0000-0003-2196-2682>

<https://orcid.org/0000-0002-5796-0649>

CEREZAS ÁCIDAS: UNA SOLUCIÓN NATURAL PARA LA GOTA

TART CHERRIES: A NATURAL SOLUTION FOR GOUT.

Andrea G. Juárez Tecua¹,
María Eugenia Castro^{2*},
Norma A. Caballero³,
Thomas Scior⁴,
Francisco J. Meléndez⁵

¹Estudiante de Maestría en Ciencias Químicas, Facultad de Ciencias Químicas,

²Centro de Química del Instituto de Ciencias (ICUAP)

³Facultad de Ciencias Biológicas.

⁴Laboratorio de Simulaciones Moleculares Computacionales, Facultad de Ciencias Químicas

⁵Laboratorio de Química Teórica, Facultad de Ciencias Químicas
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 72570, Puebla, México.
(222) 2295500 ext. 2830 y 2819

Correos

jt.245470046@alm.buap.mx

mareug.castro@correo.buap.mx*

norma.caballero@correo.buap.mx

thomas.scior@correo.buap.mx

francisco.melendez@correo.buap.mx

Resumen

La hiperuricemia es un trastorno metabólico caracterizado por concentraciones elevadas de ácido úrico sérico (≥ 6.8 mg/dl), causando diversos problemas como la gota (enfermedad reumatoide), enfermedades cardiovasculares, trastornos renales, síndrome metabólico y diabetes, entre otros. Las cerezas ácidas representan un fruto de alto impacto comercial por sus múltiples usos en la industria alimentaria; también se sabe que poseen numerosas actividades biológicas, tales como propiedades antioxidantes, anticancerígenas y antiinflamatorias, derivadas de su compleja matriz de compuestos nutraceuticos, que incluyen una alta concentración de flavonoides, ácidos fenólicos, vitaminas y otros antioxidantes específicos que las componen. Los flavonoides han atraído la atención debido a su inocuidad, eficacia y escasos efectos secundarios en el tratamiento de la hiperuricemia mediante la inhibición de la actividad de la xantina oxidasa, enzima encargada de la producción de ácido úrico en el metabolismo de las purinas.

Palabras clave: Hiperuricemia, ácido úrico, flavonoides, cerezas, xantina oxidasa, ROS, allopurinol.

Abstract

Hyperuricemia is a metabolic disorder characterized by elevated serum uric acid concentrations (≥ 6.8 mg/dL), causing various problems such as gout (a rheumatoid disease), cardiovascular diseases, renal disorders, metabolic syndrome, and diabetes, among others. Tart cherries represent a fruit of high commercial impact due to their multiple uses in the food industry; it is also known that they possess numerous biological activities, such as antioxidant, anticancer, and anti-inflammatory properties, derived from their complex matrix of nutraceutical compounds, which include a high concentration of flavonoids, phenolic acids, vitamins, and other specific antioxidants. Flavonoids have attracted attention due to their safety, efficacy, and few side effects in the treatment of hyperuricemia through the inhibition of xanthine oxidase activity, an enzyme responsible for producing uric acid in purine metabolism.

Keywords: Hyperuricemia, uric acid, flavonoids, cherries, xanthine oxidase, ROS, allopurinol

Introducción

Hiperuricemia y gota

La gota es una enfermedad metabólica conocida desde la antigüedad, descrita por los egipcios en el año 2640 a. C. como una hinchazón o inflamación dolorosa en las articulaciones. Posteriormente, Hipócrates (S. IV a. C.) describió su relación con la ingesta excesiva de alimentos y vino, así como la tendencia a presentarse más frecuentemente en hombres de edad “madura” (entre los 35 y 45 años) y de recursos económicos holgados, por lo cual la denominó “enfermedad de los reyes”. Finalmente, en el siglo XVII Sydenham, médico inglés reconocido como uno de los fundadores de la medicina clínica y la epidemiología, se observa a sí mismo y describe muy detalladamente un ataque de gota y lo relaciona con la falta de ejercicio, además del exceso de alimentos y alcohol (Revista de la Facultad de Medicina, 2014).

Cuando la concentración de ácido úrico (AU) se encuentra elevada en la sangre, recibe el nombre técnico de hiperuricemia (HU) y, cuando afecta a una o más articulaciones, es más comúnmente conocida como “gota” o “ataque de gota” (Figura 1) (Fernández et al., 2021).



Figura 1. Caricatura británica publicada en 1799 que satiriza el dolor insoportable de la enfermedad, personificando la dolencia como un demonio con garras y dientes afilados que muerden el pie de un hombre (The Gout de James Gillray, Revista de la Facultad de Medicina, 2014).

La HU no representa una enfermedad y suele ser asintomática, pero su presencia indica un estado inflamatorio crónico que requiere atención, a menudo a través de cambios en la dieta y manejo médico si los niveles de

AU son muy elevados (ej. ≥ 9 o 10 mg/dl). Los niveles normales en sangre de AU oscilan entre 2.4 y 6.0 mg/dl para las mujeres y entre 3.4 y 7.0 mg/dl para los hombres, los cuales se pueden alterar por una sobreproducción de AU, una disminución de la eliminación renal o ambos procesos (Fernández et al., 2021).

La gota se caracteriza por un incremento en las concentraciones corporales de AU con HU sostenida. Afecta predominantemente a hombres en edad adulta, mujeres posmenopáusicas y adultos mayores. Desde el punto de vista clínico, se presenta como episodios de artritis aguda o crónica debido al depósito de cristales de AU en articulaciones, tejido conectivo e intersticios renales (nefrolitiasis). Se pueden identificar tres fases (Figura 2): 1) HU asintomática, que generalmente dura 20 años y termina cuando el paciente presenta su primera crisis de artritis aguda o de nefrolitiasis, 2) gota aguda e intermitente, en la cual el paciente presenta dolor con inflamación y eritema con una duración de 12–15 días, generalmente monoarticular y, 3) artritis crónica gotosa, donde se forman depósitos continuos de cristales de AU subcutáneos llamados tofos, se presenta inflamación e incluso rigidez articular (Revista de la Facultad de Medicina, 2014, Fernández, 2021).

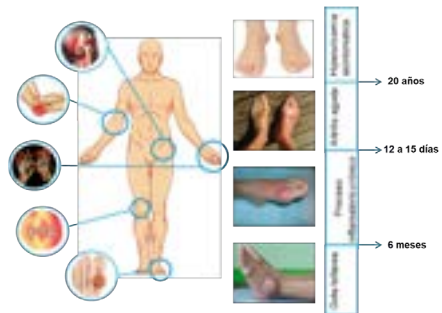


Figura 2. Articulaciones afectadas por el depósito de AU.

A la derecha se muestran las articulaciones que pueden almacenar cristales de AU; el proceso inflamatorio empieza por pies y rodillas, subiendo a cadera, manos y codos.

De lado izquierdo se muestran los signos clínicos de la evolución del proceso de HU a gota y el tiempo de duración de cada proceso (Elaboración propia en Power Point).

La prevalencia de gota en la población mundial varía del 2 al 15 %, con un claro incremento en las últimas décadas asociado a cambios en los hábitos alimenticios y al aumento de la obesidad (Revista de la Facultad de Medicina, 2014). En México, la HU afecta aproximadamente al 15% de la población adulta (Federación Mexicana de Diabetes, 2020), esto significa que cerca de 10 millones de mexicanos se encuentran con un factor de riesgo para el desarrollo de gota. En el 2017, la Secretaría de Salud estimó que el 3% de la población mexicana, es decir, 3,705,000 personas (Consejo Nacional de Población [CONAPO], 2017) padece gota. Aunque la distribución de la gota en el territorio mexicano no es uniforme, los datos epidemiológicos muestran una mayor prevalencia en las regiones del norte y centro del país. Por ejemplo, Chihuahua reporta una de las prevalencias más altas con un 0.8 %, Nuevo León un 0.3 % y la Ciudad de México mantiene un 0.4 %, en contraste con estados del sur como Yucatán o Sinaloa que reportan cifras significativamente menores, alrededor de 0.1%. Esta tendencia mayor en los estados del norte y centro del país suele atribuirse a factores dietéticos regionales, como el alto consumo de carnes rojas y bebidas azuca-

radas, sumado a índices de masa corporal más elevados en las zonas fronterizas urbanas (Secretaría de Salud, 2017, Peláez, 2011).

El paciente mexicano

La gota en México tiene un rostro predominantemente masculino, la relación de afectación es de cuatro hombres por cada mujer en edades productivas. Mientras que en los varones los síntomas suelen aparecer entre los 30 y 50 años, en las mujeres la incidencia aumenta notablemente después de la menopausia, cuando la protección natural de los estrógenos (que ayudan a eliminar el AU por la orina) disminuye. El estilo de vida (Figura 3) es el principal detonante, la dieta mexicana contemporánea favorece el desarrollo de HU debido a tres hábitos críticos: 1) alto consumo de carnes rojas, embutidos y vísceras (comunes en la dieta diaria y en la cultura del “antojito”), 2) consumo excesivo de refrescos y bebidas azucaradas, ya que el alto consumo de fructosa altera la producción de AU, 3) y el consumo de cerveza, que contiene una alta cantidad de purinas (guanosina), lo cual se suma al efecto deshidratante del alcohol, facilitando que el AU se concentre y cristalice (Secretaría de Salud, 2017).



Figura 3. Ilustración de los factores de predisposición para la elevación de la producción de AU (Elaboración propia en Power Point).

El AU es el producto final de la degradación de las purinas. Las purinas son compuestos químicos naturales que se producen en el organismo o que se adquieren por la dieta. Están involucradas en una gran cantidad de rutas metabólicas y son esenciales, ya que forman parte de la estructura del ácido desoxirribonucleico (ADN) y el ácido ribonucleico (ARN), los eslabones de la vida.

Un dato alarmante para la salud nacional es la relación de la gota con otras enfermedades. Siete de cada diez pacientes con gota presentan algún

grado de enfermedad renal crónica, y una gran porción padece simultáneamente hipertensión, obesidad y diabetes tipo 2 (Revista de la Facultad de Medicina, 2014). La HU, como ya se ha comentado, está relacionada con comorbilidades como lo es la obesidad y el síndrome metabólico, por lo cual el plan de alimentación debe personalizarse de acuerdo con las metas de control metabólico de cada paciente, la Tabla 1 presenta ejemplos de alimentos con alto y bajo contenido de purinas que se recomienda consumir o evitar a los pacientes con HU y gota (Fernández et al., 2021).

Tabla 1. Alimentos con bajo y alto contenido de purinas (Fernández et al., 2021).

Grupo de alimentos	Contenido en purinas moderado (50 a 99 mg)	Contenido en purinas alto (Mayor 150 mg)
Leguminosas	Lenteja, haba, chícharo	Semillas de soya
Cereales	Pan de caja, salvado de trigo, avena	Ninguno
Verduras	Germen de soja, champiñones, espinacas, apio, coliflor, espárrago	Ninguno
Carnes y vísceras	Conejo, pato, salchichas procesadas	Pavo, cerdo, cordero, todas las vísceras de res y cerdo
Pescados y mariscos	Salmón, bacalao, merluza, lenguado, mero, pulpo, calamar, almeja, cangrejo, langosta.	Trucha, atún, sardinas, atún en aceite
Otros		Paté, levaduras panificables, cubitos de condimento, alcohol

Xantina oxidoreductasa

La xantina oxidoreductasa (XOR) es una metaloenzima que actúa como el "último eslabón" en la degradación de las purinas transformando los desechos de estas en AU para ser eliminados del organismo por la orina. XOR se puede sintetizar en dos formas: 1) xantina deshidrogenasa (XDH), que se produce de manera normal y 2) xantina oxidasa (XO), que se produce en condiciones de estrés oxidativo; ambas formas realizan la misma reacción de conversión para la formación de AU teniendo como producto final especies reactivas de oxígeno (ROS) para XO, y coenzimas reductoras (NADH) para XDH (Figura 4) además de AU (Seychell et al., 2023).

La producción endógena de AU se da principalmente en el hígado e intestino (~ 80%), y en menor cantidad en el músculo, riñón y en el endotelio vascular (~ 20%) (Mecchella et al., 2018). Químicamente hablando, el AU es un compuesto de carbono, nitrógeno, oxígeno e hidrógeno con la fórmula $C_5H_4N_4O_3$. Es un ácido débil diprotico con $pK_{a1} = 5.4$ y $pK_{a2} = 9.8$, es decir, a un pH fisiológico de 7.4 (como en la sangre) ya ha liberado un protón y se encuentra en su forma ionizada conocida como urato monosódico (Figura 5). El término ácido úrico se usa para referirse a este urato monovalente en la bibliografía médica (Vázquez, 2018).

La sobreexpresión o hiperactividad de XO produce un aumento de la cantidad de AU y de ROS, un factor de riesgo para la aparición de gota y de daño oxidativo a los tejidos, lo que puede dar lugar a otras enfermedades vinculadas al estrés

oxidativo como inflamación y enfermedades cardiovasculares (Rullo et al., 2023), es por ello por lo que inhibir la actividad de la XO es una estrategia terapéutica crucial para disminuir la concentración de AU y reducir el estrés oxidativo vascular.

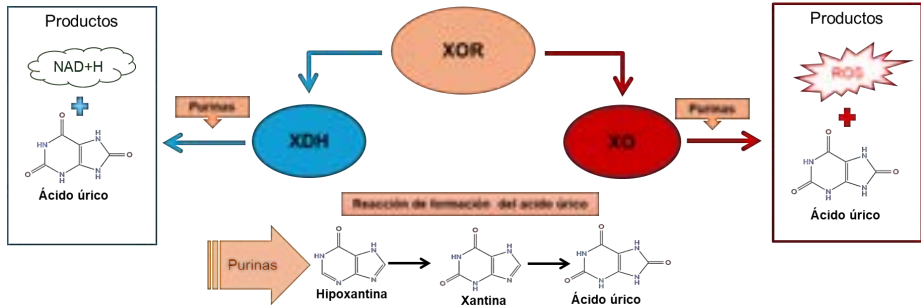


Figura 4. Formación de AU por las distintas formas de XO (Elaboración propia en Power Point y MolView <https://molview.org/>)



Figura 5. Estructura molecular 2D del ácido úrico y la formación de las sales de urato en sus constantes de acidez (Elaboración propia con MolView <https://molview.org/>).

Inhibidores de la xantina oxidasa

Los inhibidores de XO disminuyen los niveles de AU en sangre a la vez que frenan el estrés oxidativo. Se conocen tres fármacos que actúan como inhibidores de la XO: alopurinol, febuxostat y topiroxostat. El tratamiento por excelencia de la HU ha sido el alopurinol desde su descubrimiento en 1956 debido a su alta eficacia para disminuir los niveles de AU en sangre y a un costo relativamente bajo. A pesar de que el febuxostat es más eficaz que el alopurinol para

disminuir los niveles de AU, su uso suele reservarse para pacientes que no toleran este último debido a su alto precio en el mercado. Por su parte, el topiroxostat es relativamente nuevo y solo se encuentra aprobado para su uso en Japón (Seychell, 2023).

La Tabla 2 resume los mecanismos de acción y algunos efectos secundarios de los inhibidores de XO. El tratamiento de la HU y la gota suele incluir el uso

de un inhibidor combinado con un antiinflamatorio para reducir las molestias causadas por la enfermedad, sin embargo, el uso prolongado de estos fármacos desencadena la aparición de los

efectos secundarios (ver Tabla 2), por lo tanto, es de gran importancia médica descubrir nuevos inhibidores de XO con menos efectos secundarios para el paciente.

Tabla 1. Alimentos con bajo y alto contenido de purinas (Fernández et al., 2021).

Fármaco	Mecanismo de acción	Efectos secundarios
Alopurinol	Entra al sitio activo de la enzima "fingiendo" ser una purina, donde es transformado a oxi-purinol y se une fuertemente al centro activo, bloqueando la enzima desde adentro.	Nefropatía Hepatitis Síndrome de Stevens-Johnson Hipersensibilidad
Febuxostat	Bloquea la entrada al sitio activo de la enzima impidiendo el paso de su sustrato natural.	Diarrea Náuseas Elevación de las enzimas hepáticas
Topiroxostat	Se une específica y fuertemente al sitio activo de la enzima creando un complejo muy estable que bloquea la enzima por mucho tiempo.	Elevación de las enzimas hepáticas Diarrea o estreñimiento Hipersensibilidad cutánea

Cerezas ácidas

Las cerezas pertenecen a la familia de las rosáceas del género *Prunus* y subgéneros *Cerasus* y *Pradus*. Es una de las frutas más populares en la industria alimentaria y es utilizada ampliamente tanto fresca como procesada (Ferretti et al., 2010).

En la cereza, el proceso de maduración está relacionado con un cambio del color verde al inicio y rojo al final con acumulación de compuestos polifenólicos y degradación de la clorofila. Los compuestos polifenólicos se concentran en la piel y la pulpa (Figura 6), contribuyendo a las cualidades sensoriales y organolépticas de la fruta como el sabor y la astringencia. En la medicina tradicional, se utilizan como agentes profilácticos contra el daño cardiovascular, la enfermedad de Alzheimer y enfermedades inflamatorias, reducen el estrés oxidativo, mejoran el apetito, bajan la presión arterial, reducen el dolor y el daño muscular causado por el ejercicio y modulan la acción de algunas enzimas como resultado de su alto contenido de flavonoides (Ferretti et al., 2010).

Los flavonoides son metabolitos secundarios que producen las plantas para su desarrollo. El interés científico en estos metabolitos se

debe a su estructura química fundamental de 15 carbonos (C6-C3-C6), la cual consiste en dos anillos aromáticos (A y B) unidos por un anillo heterocíclico central (C) (Ochoa & Ayala, 2004). Debido a esta conformación, presentan diversas capacidades farmacológicas, como actividades antibacterianas, antienvjecimiento, antivirales y, fundamentalmente, la modulación de la actividad enzimática, por lo que se han consolidado como ingredientes clave para alimentos funcionales y el desarrollo de nuevos fármacos (Xue et al., 2023).

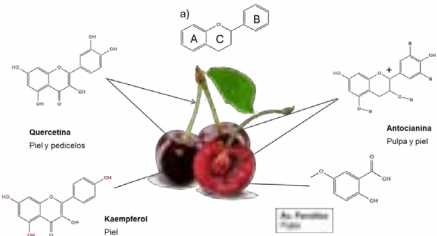


Figura 6. Compuestos polifenólicos de las cerezas ácidas y su principal ubicación. a) presenta la estructura base de los flavonoides (Elaboración propia con Power Point y MolView <https://molview.org/>).

Las cerezas se consideran una fruta rica en nutrientes y baja en calorías; aportan nutrientes importantes como betacaroteno, vitaminas C y E, potasio, magnesio, folato, hierro y fibra. Además, contiene cantidades significativas de polifenoles, incluidas antocianinas, ácidos fenólicos y queretinas. Al consumir la fruta entera, parece haber una sinergia entre los efectos antioxidantes de la vitamina C, los carotenoides y los flavonoides y se cree que esto contribuye a sus efectos beneficiosos para la salud (Bauman & Pérez, 2018).

Las cerezas y la gota

El consumo de cerezas se ha asociado con reducciones en el estrés oxidativo, la inflamación, la modulación de la glucosa y la inhibición de la producción de AU (Mc Cune et al., 2010). Uno de los primeros estudios conocidos en humanos que exploró los beneficios de la cereza para la salud se realizó en 1950 con pacientes con gota, los resultados indicaron que el consumo de cerezas ayudó a reducir los síntomas de artritis y a restablecer los niveles sanguíneos de AU, y al menos cuatro de los pacientes reportaron una mayor movilidad en las articulaciones de los dedos de las manos y los pies (Kelley et al., 2018). En un estudio piloto de 2003, diseñado para evaluar los niveles de AU en sangre antes y después de consumir un alimento rico en antocianinas como la uva (*Vitis vinifera*, Vitaceae), la fresa (*Fragaria x ananassa*, Rosaceae) el kiwi (*Actinidia deliciosa*, Actinidiaceae) y la cereza (*Prunus*, sp), diez mujeres sanas consumieron una dosis única de 280 gramos de cerezas sin hueso y se les tomaron muestras de sangre 1, 2, 3 y 5 horas después del consumo. Cinco horas después de consumir las cerezas, se observó una reducción media significativa de los niveles de AU en sangre, lo que demuestra un efecto reductor prolongado que no se observó con la uva, la fresa ni el kiwi (Mc Cune et al., 2010).

Los flavonoides pueden reducir la actividad de la XO mediante dos mecanismos principales de inhibición, la inhibición competitiva y la inhibición mixta (Xue et al., 2023). También presentan diversas actividades funcionales debido a sus diferentes estructuras (Figura 7). Por ejemplo, cuando el peso molecular de los flavonoides es

elevado (generalmente superior a 500 g/mol, como en el caso de ciertos derivados glicosilados o poliméricos), se genera un impedimento estérico dentro del sitio activo de la XO. Esto provoca interacciones repulsivas de van der Waals y desajustes electrostáticos con los residuos de aminoácidos circundantes, lo que dificulta la estabilidad del complejo y reduce significativamente su capacidad inhibitoria (Da Silva et al., 2004). Por lo cual es importante analizar el mecanismo de inhibición de los flavonoides desde una perspectiva de estructura-actividad.

A pesar de la disponibilidad de fármacos inhibidores de XO y antiinflamatorios eficaces para el tratamiento de la gota, existe un gran interés en nuevos tratamientos y enfoques para su manejo. Esto se debe a que los tratamientos existentes suelen ser de uso prolongado y pueden llegar a generar efectos secundarios de gran afectación a la salud, como lo es la hepatotoxicidad. Dado los posibles efectos beneficiosos de las cerezas, esta potente fruta se está convirtiendo en una opción cada vez más atractiva para el tratamiento y control de la gota. Desafortunadamente, existe escasez de datos que respalden actualmente el uso de cerezas o productos derivados de las cerezas en su tratamiento. Resulta imperativo emplear herramientas de química computacional como el acoplamiento molecular para dilucidar, a nivel molecular, los mecanismos de interacción entre los metabolitos secundarios de la cereza y la enzima XO, sentando así las bases teóricas para futuros ensayos in vivo. Estudios clínicos (Nakagawa et al., 2019) han demostrado que el consumo de cereza ácida reduce las concentraciones de AU sérico y retrasa la aparición de los síntomas asociados a la HU. Esta evidencia científica, respaldada por ensayos de intervención humana (Mc Cune et al., 2010) y modelos bioquímicos in vitro (Xue et al., 2023), sugiere que los beneficios de la cereza ácida no se limitan a la inhibición de la XO, sino que también ofrecen un alivio a las molestias de la enfermedad debido a su acción antiinflamatoria por su alto contenido de antocianinas. Según la literatura, el fruto contiene entre 254 y 407 mg/100g de compuestos fenólicos totales, de los cuales las

antocianinas representan una fracción determinante con valores aproximados de 12.5 a 26.6 mg/100g de peso fresco (Sokót et al., 2020). Esta composición posiciona a la cereza ácida

como una alternativa nutracéutica prometedora que podría complementar los tratamientos farmacológicos actuales, mejorando la calidad de vida de los pacientes con gota.

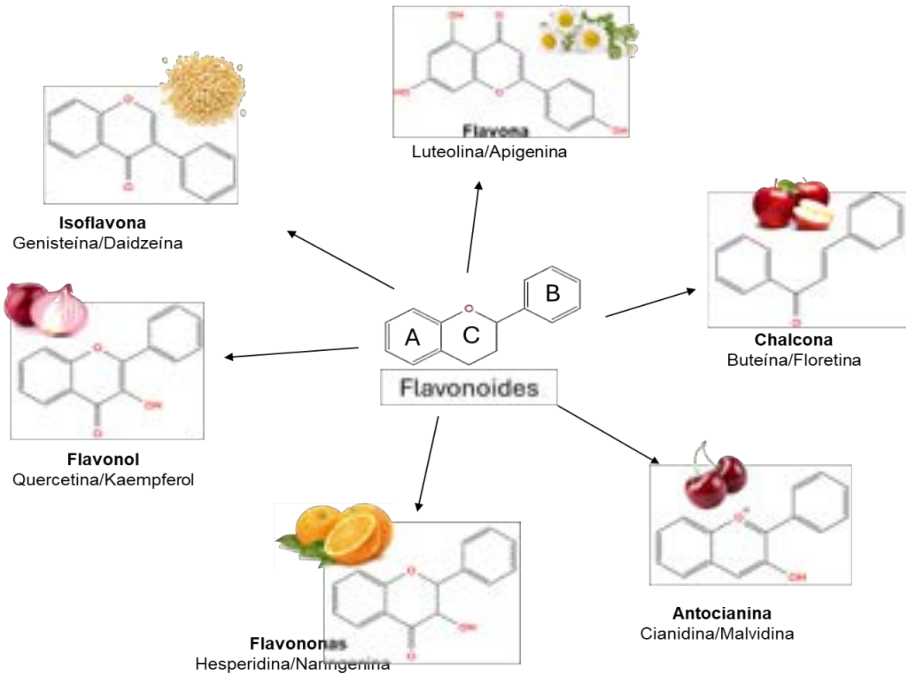


Figura 7. Ejemplos de la diferenciación de los flavonoides a partir de su estructura base con ejemplos de donde se pueden encontrar (Elaboración propia con Power Point y MolView <https://molview.org/>).

Conclusiones

La HU es un trastorno metabólico que se presenta en el 3% de la población a nivel mundial. Está considerada como un factor de riesgo para problemas de hipertensión, diabetes tipo 2, riesgo cardiovascular y síndrome metabólico que aumentan la mortalidad, por lo que es importante un tratamiento adecuado para prevenir las afecciones de dicho trastorno. En México, este panorama es especialmente preocupante debido a la alta prevalencia de obesidad y factores dietéticos que elevan los niveles de ácido úrico en la población joven y adulta. Aunque en la actualidad existen fármacos con una alta efectividad para el tratamiento de la HU y la gota, su uso prolongado genera efectos secundarios dañinos para el paciente, por lo que

el uso de flavonoides obtenidos de la dieta regular representa una ventana de oportunidad para el diseño de nuevos fármacos antihiperuricémicos, que sean más inocuos que los ya existentes con la misma efectividad. En este contexto, el empleo de herramientas computacionales para estudiar a nivel molecular los flavonoides de las cerezas ácidas como inhibidores de la XO constituye una alternativa de vanguardia. El análisis mediante acoplamiento molecular (docking) permite visualizar con precisión las interacciones en el sitio activo de la enzima, sugiriendo una capacidad inhibitoria competitiva que podría sentar las bases para el desarrollo de nuevas terapias naturales, accesibles y con menor impacto sistémico para el paciente.

Conflicto de intereses

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia. Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Los autores se descargan de responsabilidad (INTELIGENCIA ARTIFICIAL). Los autores declaran por la presente que NO se han utilizado tecnologías de IA generativa, tales como modelos de lenguaje grandes (ChatGPT, COPILOT, etc.) y generadores de texto a imagen, durante la redacción o edición de este manuscrito.

Agradecimientos

Juarez Tecua Andrea G. agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca de maestría (CVU: 2086771). Los autores agradecen a la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de posgrado (VIEP-BUAP), al Laboratorio Nacional de Supercómputo del Sureste de México (LNS-BUAP) por los recursos computacionales y al Cuerpo Académico BUAP-CA-263 de PRODEP (SEP, México).

Referencias

- Bauman & Pérez. (2018) El alimento como medicina: la cereza (*Prunus avium* y *P. cerasus*, Rosaceae). HerbalGram, 8.
- Consejo Nacional de Población. (2017). Proyecciones de la población de los municipios de México, 2015-2031. Secretaría de Gobernación.
- Da Silva, S., Da Silva, A. Honório, K., Marangoni, S., Toyama, M. (2004) Influencia de las propiedades electrónicas, estéricas e hidrofóbicas de los flavonoides en la inhibición de la xantina oxidasa. *Journal of molecular structure: THEOCHEM*, 684(1-3), 1-7.
- Federación Mexicana de Diabetes. (2016) Ácido úrico y su relación con enfermedades metabólicas en México. Reporte técnico.
- Fernández, S., Palma, I., Romero, Y., Sosa, E., Tamayo, J., Cumplido, L. (2021) La hiperuricemia y gota, limitaciones en la vida cotidiana de las personas: Caso Clínico. *Innovación y Desarrollo Tecnológico*, 14(1), 86-92.
- Ferretti, G., Bacchetti, T., Belleghia, A., Neri, D. (2010) Antioxidantes de la cereza: de la granja a la mesa. *Molecules*, 15(10), 6993.
- Iscoff, P., Paradiso, C., De Marziani, G., Elbert, A. (2017) Tratamiento de las hiperuricemias. *Revista de nefrología, diálisis y trasplante*, 37(2), 104-114.
- Kelley, D., Adkins, Y., Laugero, K. (2018) Una revisión de los beneficios de las cerezas para la salud. *Nutrientes*, 10(3), 368.
- Mc Cune, L., Kubota, C., Stedell, N., Thomson, C. (2010) Cerezas y salud: Una revisión. *Revisiones críticas en ciencia de los alimentos y nutrición*, 51, 1-12.
- Mecchella, J., Burns, C. Trastornos del metabolismo de las purinas y pirimidinas. Harrison. Principios de Medicina interna. Jameson, J., et al. 20e Ed. McGraw-Hill Education. EE. UU. 2018
- Nakagawa, T., Lanaspá, M., Johnson, R. (2019) Efectos del consumo de fruta en pacientes con hiperuricemia o gota. *Reumatología*, 58, 1133-1141.
- Ochoa, M., Ayala, A. (2004) Los flavonoides: apuntes generales y su aplicación en la industria de Alimentos. *Ingeniería y competitividad*, 6(2), 93-104.
- Peláez, I. et al. (2011) Epidemiología de las enfermedades reumáticas en México: un estudio comunitario de COPCORD. *Revista de Reumatología Clínica*, 38(3), 585.
- Revista de la Facultad de Medicina. (2014) Gota. (México), 57(4), 58-60.
- Rullo, R., Cerchia, C., Nasso, R. Romanelli, V., De Vendittis, E., Masullo, M., Lavecchia, A. (2023) Nuevos inhibidores reversibles de la xantina oxidasa dirigidos al sitio activo de la enzima. *Antioxidantes*, 12(4), 825.
- Secretaría de Salud. (2011) Gota afecta al 3 por ciento de la población mexicana. Comunicado de prensa 005.
- Seychell, B., Vella, M., Hunter, G., Hunter, T. (2023) Lo bueno y lo malo: la enzima bifuncional xantina oxidoreductasa en la producción de especies reactivas de oxígeno. *Especies reactivas de oxígeno: avances y desarrollos*. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.112498
- Sokót, A., Kucharska, A., Hodun, G., Gotba, M. (2020) Composición química de 21 cultivares de cereza ácida (*Prunus cerasus*) cultivados en Polonia. *Molecules*, 25(19), 4587.

Vázquez, J., Zetina, M., Duarte, J. (2018) Hiperuricemia e hipertensión arterial sistémica: ¿cuál es la relación? *Medicina interna de México*, 34(2), 278-287.

Xue, H., Xu, M., Gong, D., Zhang, G. (2023) Mecanismo de los flavonoides que inhiben la xantina oxidasa y alivian la hiperuricemia a partir de la relación estructura-actividad y experimentos con animales: una revisión. *Food frontiers*, 4(4), 1643-1665.

Recepción: 27.02.2026

Revisión: 25.03.2026

Publicación: 08.05.2026

<https://orcid.org/0009-0002-9784-1529>

<https://orcid.org/0009-0006-6558-7940>

<https://orcid.org/0000-0003-1719-5011>

DESCIFRANDO LA FORMA DE LA VIDA: DEL MODELADO POR HOMOLOGÍA A LA REVOLUCIÓN DE ALPHAFOLD

DECIPHERING THE SHAPE OF LIFE: FROM HOMOLOGY MODELING TO THE ALPHAFOLD REVOLUTION

Miguel Abel Salazar Hernández*

Naomi Núñez Abrech

Jorge Lozano Aponte

Tecnológico de Monterrey, Campus Puebla. Escuela de
Ingeniería y Ciencias, Departamento de Bioingeniería. Salón
2309, Edificio Aulas 2.

Vía Atlixcáyotl No. 5718, Reserva Territorial Atlixcáyotl, C.P.
72453, Puebla, Puebla, México.

Correos:

A01737286@tec.mx

A01737393@tec.mx

jorge.lozanoaponte@tec.mx

Resumen

El presente artículo presenta la herramienta AlphaFold, una innovación de DeepMind que ha transformado la predicción de estructuras de proteínas mediante inteligencia artificial. Tradicionalmente, determinar la conformación tridimensional de una proteína solía depender de técnicas experimentales complejas, costosas y lentas como cristalografía de rayos X, resonancia magnética nuclear o criomicroscopía electrónica. Aunque el modelado por homología aportó avances, no podía abarcar la enorme cantidad de secuencias disponibles. AlphaFold revolucionó este campo al predecir estructuras directamente a partir de la secuencia de aminoácidos con una precisión comparable a métodos experimentales, generando más de 200 millones de modelos y superando por mucho las 245 mil estructuras del Protein Data Bank en 2025. Su impacto en la biomedicina ya es evidente: permitió identificar dominios funcionales en proteínas de *Plasmodium falciparum*, abriendo nuevas vías contra la malaria, y facilitó el estudio de interacciones de la proteína Ras, relevante en múltiples cánceres. Por esta revolución científica, Hassabis, Jumper y Baker recibieron el Premio Nobel de Química 2024. AlphaFold ha acelerado el diseño de fármacos, la ingeniería de proteínas y la comprensión molecular de enfermedades, consolidando a la inteligencia artificial como un pilar central de la biología estructural moderna.

Palabras clave: proteínas, enzimas, modelado por homología, AlphaFold

Abstract

This article presents AlphaFold, the artificial intelligence innovation developed by DeepMind that has transformed protein structure prediction. Traditionally, determining the three-dimensional conformation of a protein depended on experimental techniques such as X-ray crystallography, NMR, and cryo-EM, all of which are complex, expensive, and time-consuming. Although homology modeling provided important advances, it could not keep pace with the vast number of available sequences. AlphaFold revolutionized the field by predicting 3D structures directly from amino acid sequences with accuracy comparable to experimental methods, generating more than 200 million models and far surpassing the 245,000 structures in the Protein Data Bank in 2025. Its impact on biomedicine is already evident: it enabled the identification of functional domains in *Plasmodium falciparum* proteins, opening new avenues for antimalarial strategies, and facilitated the study of Ras protein interactions, a key factor in multiple cancers. For this scientific breakthrough, Hassabis, Jumper, and Baker received the 2024 Nobel Prize in Chemistry. AlphaFold has accelerated drug design, protein engineering, and the molecular understanding of diseases, establishing artificial intelligence as a central pillar of modern structural biology.

Keywords: Proteins, enzymes, homology modeling, AlphaFold

Quando la IA revela lo invisible: la revolución de AlphaFold

Imagina poder desentrañar los secretos íntimos de las moléculas de la vida sin necesidad de esperar años en laboratorios complejos. En la actualidad, la humanidad, a través de inteligencia artificial ha conseguido lo impensable: predecir la estructura tridimensional de casi todas las proteínas que conocemos, sólo a partir de su secuencia de aminoácidos. Este avance, liderado por DeepMind con su herramienta AlphaFold, es más que un logro técnico, es una revolución en el mundo de la biología que está transformando la ciencia, la medicina y nuestra comprensión de la vida misma.

¿Qué son las proteínas y las enzimas y por qué es relevante su estudio?

Las proteínas son diminutas máquinas a nivel molecular en nuestro cuerpo, ya sean enzimas que digieren comida en nuestro estómago, anticuerpos que luchan contra virus, o incluso hemoglobina que transporta oxígeno en la sangre. Cada proteína está compuesta por una secuencia de aminoácidos, los bloques de construcción que determinan su forma tridimensional única (Alberts et al., 2002), como un rompecabezas 3D, y esa forma es clave para su función.

¿Cómo y para qué conocer la "forma" o estructura de una proteína o enzima?

Conocer la forma tridimensional de una proteína permite entender cómo funciona y diseñar fármacos que se ajusten a ella como una llave en una cerradura. Tradicionalmente, esa forma se obtiene "fotografiando" la molécula mediante técnicas experimentales como la cristalografía de Rayos X (RX), la resonancia magnética nuclear (NMR) y la criomicroscopía electrónica (cryo-EM). Aunque estas técnicas han resuelto decenas de miles de estructuras durante décadas en la ciencia, cada una tiene limitaciones prácticas que hacen que la solución no sea siempre posible. La cristalización necesaria para RX suele ser imprecisa y muchas proteínas no forman cristales (Davis et al., 2008); NMR es complicada con proteínas grandes por pér-

dida de señal (Belsom et al., 2016); cryo-EM, pese a sus grandes avances, tiene problemas con regiones muy flexibles o proteínas pequeñas (D'Imprima & Kühlbrandt, 2021). Por eso, determinar estructuras experimentales sigue siendo costoso, laborioso y en ciertos casos infructuoso, y fue precisamente este cuello de botella el que impulsó el desarrollo de métodos computacionales como AlphaFold.

¿Qué es el modelado por homología? Un Truco Inteligente de la Ciencia

Aquí entra el modelado por homología. "Homología" viene del griego y significa "semejanza". Si dos proteínas de especies diferentes (como un humano y un ratón) comparten al menos un 30% de similitud en su secuencia de aminoácidos, podemos usar la estructura 3D conocida de una como plantilla para predecir la de la otra, ajustando las diferencias con algoritmos informáticos (Xiang, 2006; Johnson et al., 2008; Kolinski, 2000). Esto acelera el proceso enormemente para predecir la forma tridimensional de proteínas desconocidas, ya que no necesitas experimentar con cada proteína nueva desde cero.

AlphaFold: El Campeón de la Predicción de Estructuras

AlphaFold, desarrollado por DeepMind en 2018, llegó para cambiar radicalmente el panorama. Esta herramienta de inteligencia artificial, basada en redes neuronales profundas que imitan el cerebro humano, predice formas tridimensionales de las proteínas con una precisión asombrosa, casi como si pudiera "ver" las proteínas antes de que existan (Senior et al., 2019). En 2020, AlphaFold sorprendió al mundo al resolver el desafío CASP (Critical Assessment of Protein Structure Prediction) en su 14ª edición, prediciendo estructuras con una exactitud comparable a métodos experimentales. ¿Cómo lo hace? Entrena con miles de proteínas cuya estructura ya se conoce y, a partir de ellas, identifica patrones de plegamiento; compara la nueva proteína con secuencias similares para inferir cómo interactúan sus aminoácidos y, con ayuda de una red neuronal avanzada, construye directamente un modelo tridimensional que luego ajusta para obtener la forma final más probable (Senior et al., 2019).

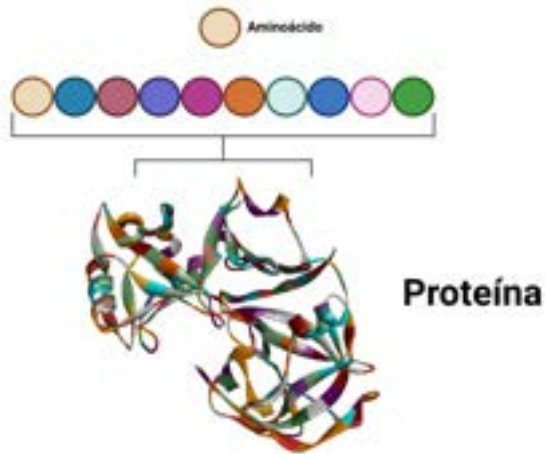


Figura 1. Relación entre la secuencia lineal de aminoácidos y la estructura tridimensional de la enzima digestiva pepsina. Los aminoácidos (círculos de distintos colores) se ensamblan en una cadena lineal que, al plegarse, adquiere una conformación tridimensional específica que determina la función de la proteína. Elaboración propia con el software Discovery Studio 2025 y la plataforma de diseño Canva <https://canva.link/htd8gr80qj7xaz>.



Figura 2. Precisión mediana del modelado de proteínas en distintas ediciones del CASP. El eje vertical muestra el puntaje de la Prueba de Distancia Global (GDT, por sus siglas en inglés), una métrica que evalúa la exactitud estructural comparando el modelo predicho de la proteína con la estructura real; valores más altos indican mayor coincidencia. Un puntaje superior a 90 se considera aproximadamente igual a una estructura de proteína determinada experimentalmente (DeepMind, 2020) <https://deepmind.google/blog/alpha-fold-a-solution-to-a-50-year-old-grand-challenge-in-biology/>

Su importancia radica en que, experimentalmente, las estructuras 3D de las proteínas (la forma funcional) se resuelven mediante técnicas como la cristalografía de rayos X, la resonancia magnética nuclear y la criomicroscopía electrónica, que poseen limitaciones para capturar la imagen real de las proteínas, por lo que no es sorpresa que el número de proteínas con estructuras resueltas sea pequeño, teniendo solo 245,013 entradas en el PDB (Protein Data Bank, la base de datos principal de estructuras de proteínas) en 2025, comparado con las 245 millones de

secuencias de proteínas conocidas en UniProtKB, la mayor base de datos de secuencias de proteínas (RCSB Protein Data Bank, 2025; Bateman et al., 2024). El modelado mediante AlphaFold apareció para llenar esos huecos, logrando que hasta el día de hoy se hayan resuelto más de 200 millones de estructuras de proteínas, cubriendo casi todas las proteínas conocidas en el planeta (AlphaFold Protein Structure Database, 2021; Callaway 2022). Sin el desarrollo de esta tecnología, el progreso sería como caminar en la niebla: lento y arriesgado.

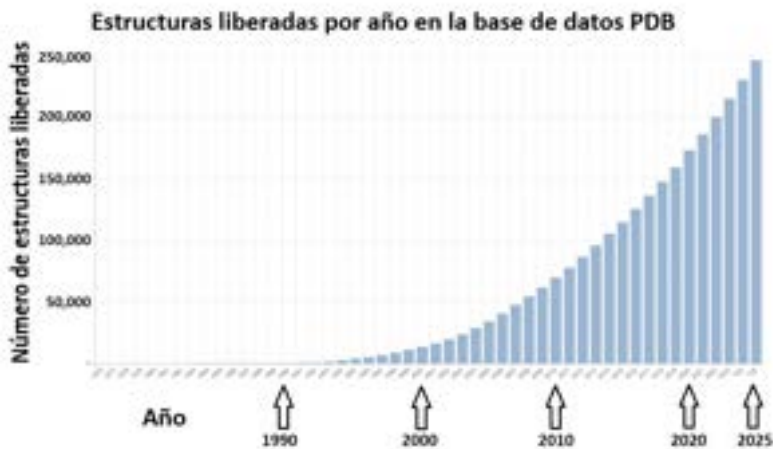


Figura 3. Crecimiento acumulado del número de estructuras depositadas en el Protein Data Bank (PDB) por año. La gráfica muestra el aumento de estructuras macromoleculares desde 1976 hasta 2025, principalmente por los métodos de cristalografía de rayos X, resonancia magnética nuclear (NMR) y criomicroscopía electrónica (cryo-EM). Basado en RCSB Protein Data Bank (2025) <https://www.rcsb.org/stats/growth/growth-released-structures>

El Premio Nobel: Un Reconocimiento Merecido

En 2024, el Premio Nobel de Química fue otorgado a Demis Hassabis y John Jumper (de DeepMind) junto con David Baker (de la Universidad de Washington), por sus contribuciones a la predicción de estructuras de proteínas usando IA. Hassabis y Jumper lideraron AlphaFold, mientras que Baker desarrolló Rosetta, otro software de modelado (Nobel Prize in Chemistry, 2024). Este premio no es solo un

aplauso; es un hito que destaca cómo la fusión de biología y tecnología está cambiando el mundo. Antes de AlphaFold y Rosetta, predecir una estructura de proteína era como intentar resolver un rompecabezas de un millón de piezas sin ver la imagen de la caja: lento, costoso y a menudo fallido. Ahora, con estas herramientas, podemos "ver" proteínas que nunca se habían observado

experimentalmente, abriendo puertas a tratamientos médicos personalizados, vacunas más rápidas contra pandemias o incluso enzimas que combaten el cambio climático (Weng et al., 2022).

El Nobel reconoce que Hassabis, Jumper y Baker no solo predijeron estructuras, sino que pusieron la IA al servicio de la humanidad, transformando la teoría en aplicaciones reales que salvan vidas.

Tabla 1. Ventajas y desventajas del modelado de proteínas mediante AlphaFold.

Ventajas	Desventajas
Alta precisión estructural con datos robustos (Jumper et al., 2021).	Baja precisión en regiones flexibles o desordenadas (Ruff & Pappu, 2021).
Acelera el diseño de proteínas y fármacos (Yang et al., 2023).	Predice únicamente una sola forma de la proteína (Saldaño et al., 2022).
Aprende cómo debe ser la estructura de la proteína con tan solo la secuencia (Senior et al., 2019).	Incapaz de modelar ligandos, iones o ácidos nucleicos (Perrakis & Sixma, 2021).
Predicción precisa de interacciones proteína-proteína (Bryant et al., 2022; Yin et al., 2022).	No predice plegamientos que no estén previamente registrados en la base de datos (Bertoline et al., 2023).
Amplía la cobertura de proteínas humanas (Porta-Pardo et al., 2022).	Alta demanda computacional para funcionar (Bertoline et al., 2023).

¿Para qué se usa y por qué es relevante para las ciencias?

El modelado por homología mediante AlphaFold es crucial porque acelera el descubrimiento científico, como un atajo en un laberinto de misterios moleculares. Imagina que quieres diseñar un medicamento para una enfermedad rara, como una que afecta solo a unas pocas personas en el mundo. Muchas enfermedades, como el cáncer, aparecen cuando ciertas proteínas dejan de hacer bien su trabajo, lo que permite que algunas células comiencen a crecer sin control. En ese caso, si puedes predecir su estructura rápidamente usando modelado por homología, puedes diseñar fármacos que se "enganchen" a ellas como una llave en una cerradura, bloqueando su mal funcionamiento y restaurando el equilibrio en el cuerpo.

En los últimos 60 años, los científicos han podido utilizar métodos experimentales avanzados para determinar la estructura de más de 180 mil proteínas, por ejemplo, ayudando así a poder determinar la estructura de la hemoglobina para poder tratar la enfermedad de anemia falciforme con diferentes tratamientos, determinar la estructura de proteínas virales como SARS-Cov-2 y desa-

rollar su vacunar, determinar la estructura del centro de reacción fotosintética y poder ampliar el conocimiento y comprensión de la fotosíntesis de las plantas (AlphaFold, 2023).

Otro éxito notable es el uso de AlphaFold para descifrar la estructura de cientos de proteínas del parásito *Plasmodium falciparum* (causante de la malaria), cuyas funciones eran un completo misterio. Con estas estructuras en mano, aplicaron un método llamado DALI (*Distance-matrix ALIGNment*), que compara formas de proteínas incluso cuando sus secuencias no se parecen, algo así como reconocer que dos llaves abren puertas similares aunque estén hechas de materiales distintos. Este enfoque permitió identificar los dominios, los cuales son puntos de anclaje o interruptores de las proteínas, activando o desactivando funciones en la célula. De este modo, AlphaFold ofrece pistas valiosas sobre nuevas funciones y posibles puntos débiles del parásito, lo que a futuro podría ayudar en el desarrollo de tratamientos más precisos contra la malaria (Behrens & Spielmann, 2024). Asimismo, AlphaFold se convirtió en una herra-

mienta para entender cómo la proteína Ras (una de las más implicadas en el desarrollo de diversos cánceres) se conecta con otras moléculas que provocan el crecimiento de los tumores. En investigaciones usaron AlphaFold para predecir con gran precisión la forma tridimensional de diversos dominios de proteínas donde Ras se puede anclar. Lo notable es que esta tecnología pudo modelar estos dominios incluso cuando no existían estructuras experimentales previas, logrando calcular la

fuerza de unión entre Ras y cada dominio, lo que no sólo reveló qué interacciones podrían predominar dentro de las células tumorales. Este enfoque permitió acelerar la investigación sin depender de métodos experimentales lentos como la cristalografía, y abre la puerta al diseño de moléculas que bloqueen estas uniones clave, una estrategia prometedora para frenar tumores impulsados por Ras como los cánceres de páncreas, pulmón y colon (Junk & Kiel, 2023; Zhao & Zhao, 2025).

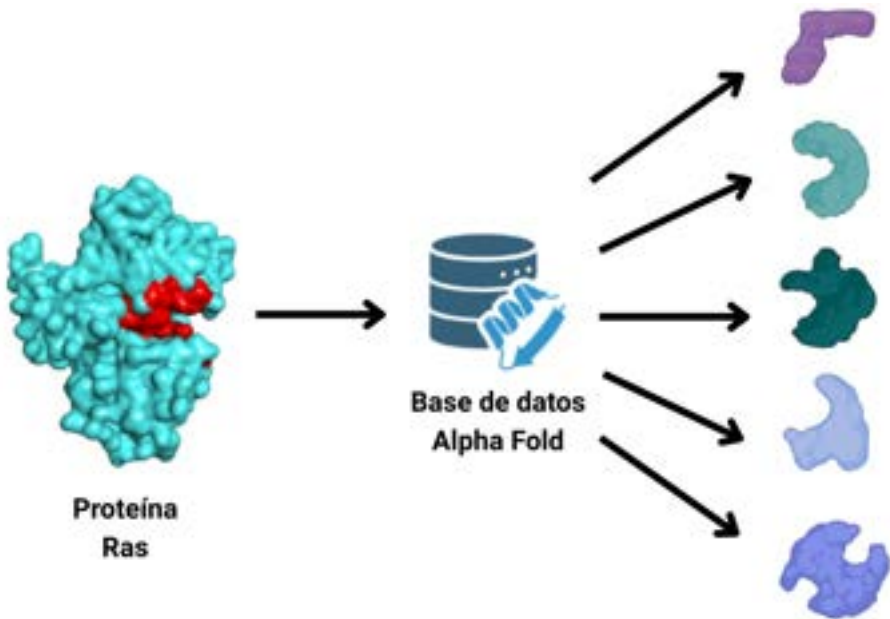


Figura 4. Representación esquemática del proceso mediante el cual AlphaFold predice posibles dominios proteicos capaces de unirse a Ras. A partir de la estructura tridimensional de Ras (cian) y su región de interacción clave (rojo), AlphaFold utiliza su base de datos y modelos de predicción para generar múltiples conformaciones de dominios candidatos. Elaboración propia con el software

ChimeraX y la plataforma de diseño Canva <https://canva.link/8mjdw22h9108k4j>.

Conclusiones

Durante décadas, descubrir la forma tridimensional de una proteína fue una tarea colosal que podía consumir años de trabajo en el laboratorio, y aún así no siempre daba resultados. El modelado por homología fue un primer paso ingenioso para acelerar ese proceso, pero llegó AlphaFold y lo cambió todo. Esta herramienta de inteligencia artificial es capaz de predecir la forma de una proteína con una precisión sorprendente, logrando en años lo que la ciencia tradicional no habría podido alcanzar en siglos, y abriendo posibilidades inimaginables como la identificación de puntos débiles en el parásito que causa la malaria o entender como ciertas proteínas impulsan el crecimiento de tumores can-

cerosos. No obstante, como cualquier herramienta, presenta ciertas limitaciones, ya que le resulta difícil analizar partes muy flexibles de las proteínas, sólo puede predecir una forma por proteína cuando en realidad estas pueden moverse y cambiar, únicamente puede predecir estructuras similares a las que ya conoce y necesita computadoras muy potentes para funcionar. Estas limitaciones nos recuerdan que AlphaFold es un poderoso punto de partida, no una solución definitiva. Aún así representa una nueva forma de hacer ciencia, una en la que la inteligencia artificial y la biología trabajan juntas para revelar los secretos más profundos de la vida y ponerlos al servicio de la humanidad.

Conflicto de intereses

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Descargo de Responsabilidad (Inteligencia Artificial) Los autores declaran por la presente que NO se han utilizado tecnologías de IA generativa, tales como modelos de lenguaje grandes (ChatGPT, COPILOT, etc.) y generadores de texto a imagen, durante la redacción o edición de este manuscrito.

Agradecimientos

Nuestro más sincero agradecimiento al Dr. Julián Alejandro Yunes Rojas, Dra. Laura Abisai Pazos Rojas y Dra. Irma Cruz Solís, cuya invaluable formación académica, experiencia y guía han sido esenciales para la realización de este artículo.

Referencias

- Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J., Raff, M., Roberts, K., & Walter, P. (2002). *Molecular Biology of the Cell*. Nih.gov; Garland Science. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK26830/>
- AlphaFold Protein Structure Database (2021). AlphaFold Protein Structure Database. Ebi.ac.uk. <https://alphafold.ebi.ac.uk/about>
- AlphaFold (2023). ¿Por qué es importante poder predecir la estructura 3D de una proteína? AlphaFold. <https://alphafold.ebi.ac.uk/about#nav-content-3>
- Bateman, A., Martin, M.-J., Orchard, S., Magrane, M., Adesina, A., Ahmad, S., Bowler-Barnett, E. H., Hema Bye-A-Jee, Carpentier, D., Denny, P., Fan, J., Garmiri, P., Jose, L., Hussein, A., Alexandr Ignatchenko, Insana, G., Rizwan Ishtiaq, Joshi, V., Dushyanth Jyothi, & Swaathi Kandasamy. (2024). UniProt: the Universal Protein Knowledgebase in 2025. *Nucleic Acids Research*, 53(D1), D609–D617. <https://doi.org/10.1093/nar/gkae1010>
- Behrens, H. M., & Spielmann, T. (2024). Identification of domains in *Plasmodium falciparum* proteins of unknown function using DALI search on AlphaFold predictions. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-60058-x>
- Belsom, A., Schneider, M., Fischer, L., Brock, O., & Rappsilber, J. (2016). Serum Albumin Domain Structures in Human Blood Serum by Mass Spectrometry and Computational Biology. *Molecular & Cellular Proteomics*, 15(3), 1105–1116. <https://doi.org/10.1074/mcp.m115.048504>
- Bertoline, L. M. F., Lima, A. N., Krieger, J. E., & Teixeira, S. K. (2023). Before and after AlphaFold2: An overview of protein structure prediction. *Frontiers in Bioinformatics*, 3. <https://doi.org/10.3389/fbinf.2023.1120370>
- Bryant, P., Pozzati, G., & Elofsson, A. (2022). Improved prediction of protein-protein interactions using AlphaFold2. *Nature Communications*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28865-w>
- Callaway, E. (2022). The entire protein universe: AI predicts shape of nearly every known protein. *Nature*, 608, 15–16.
- Davis, A. M., St-Gallay, S. A., & Kleywegt, G. J. (2008). Limitations and lessons in the use of X-ray structural information in drug design. *Drug discovery today*, 13(19-20), 831–841. <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2008.06.006>
- DeepMind (2020). AlphaFold: A solution to a 50-year-old grand challenge in biology. <https://deepmind.google/blog/alphafold-a-solution-to-a-50-year-old-grand-challenge-in-biology/>
- D'Imprima, E., & Kühlbrandt, W. (2021). Current limitations to high-resolution structure determination by single-particle cryoEM. *Quarterly Reviews of Biophysics*, 54, e4. <https://doi.org/10.1017/s0033583521000020>
- Johnson, M. S., Srinivasan, N., Sowdhamini, R., & Blundell, T. L. (2008). Knowledge-Based Protein Modeling. *Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology*, 29(1), 1–68. <https://doi.org/10.3109/10409239409086797>
- Jumper, J., Evans, R., Pritzel, A., Green, T., Figurnov, M., Olaf Ronneberger, Tunyasuvunakool, K., Bates, R., Augustin Židek, Potapenko, A., Bridgland, A., Meyer, C., Simon, Ballard, A. J., Cowie, A., Bernardino Romera-Paredes, Nikolov, S., Jain, R., Adler, J., & Back, T. (2021). Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold. *Nature*, 596(7873), 583–589. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03819-2>

- Junk, P., & Kiel, C. (2023). Structure-based prediction of Ras-effector binding affinities and design of “branchegetic” interface mutations. *Structure*, 31(7), 870–883.e5. <https://doi.org/10.1016/j.str.2023.04.007>
- Kolinski, A., Rotkiewicz, P., Iłkowski, B., & Skolnick, J. (2000). A method for the improvement of threading-based protein models. *Proteins: Structure, Function, and Genetics*, 37(4), 592–610. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0134\(19991201\)37:4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0134(19991201)37:4)
- Nobel Prize in Chemistry (2024). NobelPrize.org. Recuperado de <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2024/summary/>
- Perrakis, A., & Sixma, T. K. (2021). AI revolutions in biology. *EMBO Reports*, 22(11). <https://doi.org/10.15252/embr.202154046>
- Porta-Pardo, E., Ruiz-Serra, V., Valentini, S., & Valencia, A. (2022). The structural coverage of the human proteome before and after AlphaFold. *PLoS computational biology*, 18(1), e1009818. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1009818>
- RCSB Protein Data Bank (2025). PDB Statistics: Overall Growth of Released Structures Per Year. PDB. <https://www.rcsb.org/stats/growth/growth-released-structures>
- Saldaño, T., Escobedo, N., Marchetti, J., Zea, D. J., Mac Donagh, J., Vélez Rueda, A. J., Gonik, E., García Melani, A., Novomisky Nechcoff, J., Salas, M. N., Peters, T., Demitroff, N., Fernández Alberti, S., Palopoli, N., Fornasari, M. S., & Parisi, G. (2022). Impact of protein conformational diversity on AlphaFold predictions. *Bioinformatics*, 38(10), 2742–2748. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btac202>
- Senior, A. W., Evans, R., Jumper, J., Kirkpatrick, J., Sifre, L., Green, T., Qin, C., Židek, A., Nelson, A. W. R., Bridgland, A., Penedones, H., Petersen, S., Simonyan, K., Crossan, S., Kohli, P., Jones, D. T., Silver, D., Kavukcuoglu, K., & Hassabis, D. (2019). Protein structure prediction using multiple deep neural networks in the 13th Critical Assessment of Protein Structure Prediction (CASP13). *Proteins: Structure, Function, and Bioinformatics*, 87(12), 1141–1148.
- Weng, Y., Pan, C., Shen, Z., Chen, S., Xu, L., Dong, X., & Chen, J. (2022). Identification of Potential WSB1 Inhibitors by AlphaFold Modeling, Virtual Screening, and Molecular Dynamics Simulation Studies. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2022, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2022/4629392>
- Xiang, Z. (2006). Advances in Homology Protein Structure Modeling. *Current Protein and Peptide Science*, 7(3), 217–227. <https://doi.org/10.2174/138920306777452312>
- Yang, Z., Zeng, X., Zhao, Y., & Chen, R. (2023). AlphaFold2 and its applications in the fields of biology and medicine. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, 8(1), 115–115. <https://doi.org/10.1038/s41392-023-01381-z>
- Yin, R., Feng, B. Y., Varshney, A., & Pierce, B. G. (2022). Benchmarking AlphaFold for protein complex modeling reveals accuracy determinants. *Protein Science*, 31(8). <https://doi.org/10.1002/pro.4379>
- Zhao, G., & Zhao, Y. (2025). Unveiling KRAS mutant structures with AlphaFold 3: New avenues for targeted cancer therapy. *bioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2025.05.16.654380>

Recepción: 19.03.2026

Revisión: 30.03.2026

Publicación: 08.05.2026

<https://orcid.org/0000-0001-8631-8535>

<https://orcid.org/0000-0001-6125-4782>

<https://orcid.org/0000-0002-2093-8122>

<https://orcid.org/0000-0003-4524-0115>

EL METEPANTLE: TÉCNICAS ANCESTRALES PARA PROBLEMAS AMBIENTALES

THE METEPANTLE: ANCIENT TECHNIQUES FOR ENVIRONMENTAL PROBLEMS

Josefina Cervantes Vargas¹

Miguel Ángel Valera Pérez²

Yaselda Chavarín Pineda²

María Guadalupe Tenorio Arvide^{2*}

¹Doctorante en Ciencias Ambientales, Instituto de Ciencias (ICUAP)

²Centro de Investigación en Ciencias Agrícolas, Instituto de Ciencias (ICUAP)

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.

Correos:

cv224570195@alm.buap.mx

miguel.valera@correo.buap.mx

yaselda.chavarinp@correo.buap.mx

*tenorio.arvide@correo.buap.mx

Resumen

En un mundo que exige una producción de alimentos cada vez más intensa, los suelos enfrentan un grave proceso de degradación. Esto se debe, en gran medida, a prácticas agrícolas cuyo único objetivo es maximizar el rendimiento a corto plazo. El cambio de uso de suelo de forestal a agrícola provoca fragmentación, pérdida de biodiversidad, degradación del suelo y erosión. Esta última impacta negativamente la producción de alimentos y agua. Ante esta situación, ha sido necesario reivindicar los sistemas agrícolas tradicionales del Altiplano Central Mexicano. Sus técnicas, practicadas desde la época prehispánica, representan una alternativa para el desarrollo de una agricultura sostenible. Uno de estos sistemas de uso tradicional es el sistema metepantle, cuyo elemento principal, el maguey pulquero (*Agave salmiana*), en combinación con otros elementos como árboles frutales y maderables, zonas de cultivo (sistema milpa, cebada, etc.), zanjas y jagüeyes, crea un sistema complejo que proporciona múltiples beneficios ecológicos, sociales y económicos. En este contexto, el objetivo de este artículo es impulsar y divulgar el conocimiento sobre los beneficios que este sistema agroecológico proporciona, lo cual permitirá reconocer, por parte de la sociedad y las personas involucradas, la importancia de su restablecimiento.

Palabras clave: agricultura tradicional; agroecológico; maguey pulquero (*Agave salmiana*); restauración del suelo..

Abstract

In a world that demands increasingly intensive food production, soils face severe degradation. This is largely due to agricultural practices whose sole objective is to maximize short-term yields. The conversion of forest land to agricultural land leads to fragmentation, loss of biodiversity, soil degradation, and erosion. The latter negatively impacts food and water production. Given this situation, it has become necessary to reclaim the traditional agricultural systems of the Central Mexican Highlands. Their techniques, practiced since pre-Hispanic times, represent an alternative for the development of sustainable agriculture. One of these traditional systems is the metepantle system, whose main element is the maguey pulquero (*Agave salmiana*), which, in combination with other elements such as fruit and timber trees, cultivated areas (milpa system, barley, etc.), ditches, and ponds, creates a complex system that provides multiple ecological, social, and economic benefits. In this context, the objective of this article is to promote and disseminate knowledge about the benefits that this agroecological system provides, which will allow society and the people involved to recognize the importance of its restoration.

Keywords: traditional agriculture; agroecological; pulque maguey (*Agave salmiana*); soil restoration.

Introducción

A pesar de casi un siglo de investigación, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2019) menciona que en diversas regiones del mundo la erosión del suelo ocasionada por agua, viento y labranza sigue siendo una de las principales amenazas para la salud y los servicios ecosistémicos de este recurso.

En este contexto, algunas de las principales consecuencias de este fenómeno son la disminución de la productividad agrícola y la alteración de las funciones de los ecosistemas (FAO, s.f.-a).

Frente a la crisis alimentaria y la degradación del suelo, se ha observado un creciente interés por estudiar los sistemas agrícolas tradicionales como una alternativa sostenible.

Estos esfuerzos se gestionan desde un marco transdisciplinario que integra las partes interesadas, incluyendo a campesinos, académicos, entidades gubernamentales y diversas instituciones comprometidas con el desarrollo rural (Moreno-Calles et al., 2013).

En este mismo sentido, uno de los agroecosistemas de uso tradicional más importantes, que se desarrolla desde épocas prehispánicas en Mesoamérica, y de forma más específica en el Altiplano Central Mexicano (ACM), es el sistema *metepantle*, el cual proporciona múltiples servicios ecosistémicos a la humanidad desde distintos ámbitos como el social, económico y ambiental, donde se destaca la provisión de alimentos, la protección del suelo ante la erosión, la infiltración de agua al subsuelo y retención de humedad, entre otros (González-Jácome, 2014).

Considerando lo anterior, este trabajo se propone ofrecer una visión global del sistema *metepantle*. Se examinan sus antecedentes, su estructura y los diversos servicios ecosistémicos que brinda, subrayando la urgencia de su revalorización y restablecimiento.

Origen del sistema agroecológico

En Mesoamérica, y específicamente en México, se han identificado diversos sistemas agrícolas tradicionales, entre los que se destacan la roza, barbecho, intensivo de secano y de humedad y de riego (Palerm, 2008). En las laderas empinadas y al borde de barrancas del ACM se identificó el sistema de terrazas y bancales de secano, especialmente en tierras frías y templadas, donde las estaciones sin precipitación son largas y las temperaturas en algunas épocas del año son bajas (Rojas, 1991). Ante estas condiciones, los campesinos que habitan estas regiones mantienen una lucha constante por mantener el suelo, su fertilidad y humedad, así como también disminuir el efecto de las heladas, para lo cual han desarrollado sistemas de terrazas que tienen registros con antigüedad de entre 2.000 y 3.000 años en el Valle de Tehuacán, Centro de México y Oaxaca (Donkin, 1979; Wilken, 1987).

Algunos investigadores identifican las terrazas como construcciones de piedra o adobe para retener el suelo, y a los bancales como terrazas de laderas suaves donde el suelo es retenido mediante vegetación (Palerm, 2008). Sin embargo, otros autores identifican a las terrazas en pendientes ligeras como *metepantlis* o semiterrazas (Moreno-Calles et al., 2013).

El origen del *metepantle* en la zona del ACM se remonta a etapas prehispánicas de más de 2000 años con registros de este sistema agroecológico en los valles altos del estado de Tlaxcala, Puebla, Estado de México e Hidalgo (SEMARNAT, 2020). (Figura 1)

En sus inicios, la construcción de terrazas era utilizada para nivelar terrenos, así como también para la construcción de casas habitacionales; sin embargo, con el paso del tiempo se le fueron agregando diferentes elementos como la construcción de zanjas y depósitos para el almacenamiento de agua, conocidos como jagüeyes o represas (Moreno et al., 2020).



Figura 1. Estados de la República Mexicana con presencia de metepantle. Elaboración propia con información de SEMARNAT (2020).

La palabra *metepantle*, *metepantli*, *metepantle* o *metepantle* es una palabra que deriva del náhuatl *metl*, que significa “maguey”, y *pantli*, espacio entre” (Moreno-Calles et al., 2013). En otros estudios también se analiza si el significado del vocablo *metepantli* corresponde al de “pared de magueyes” (González-Jácome, 2003), sin embargo, los campesinos de la zona de Tlaxcala identifican el *metepantle* como a todo el conjunto

de elementos que integran el sistema agroecológico (Moreno-Calles et al., 2013). De esta forma, un *metepantle* es un sistema de cultivo en forma de terrazas que considera principalmente espacios para cultivos y para bordos donde se establecen magueyes acompañados de otros elementos de vegetación, cuyas funciones principales son evitar la erosión, favorecer la infiltración y proteger los cultivos del viento (Pérez, 2012).



Figura 2. Sistema metepantle en su incipiente restablecimiento en el Parque Nacional La Malinche. Fuente: Fotografía propia.

El sistema metepantle y sus elementos

El sistema *metepantle* es un sistema agroecológico cuyo distintivo principal es el establecimiento de maguey en los bordos del sistema de terrazas, en filas perpendiculares a la pendiente del terreno (García et al., 2020; Ríos y Martínez, 2019).

Además de los magueyes, el sistema (Figuras 2 y 3) también considera como elementos destacados las zonas de cultivo, vegetación secundaria y, en algunos casos, zanjas o cajetes y depósitos de agua o jagüeyes (González-Jácome, 2014).



Figura 3. Elementos principales del sistema agroecológico metepantle.
Fuente: Elaboración propia.

Zonas cultivables

Las zonas cultivables están destinadas a la siembra de diferentes sistemas de cultivo dentro de los que se destacan el maíz, frijol, avena, cebada, chícharo, alfalfa, entre otros, en función de la región donde se desarrolle el sistema (Álvarez-Duarte et al., 2018). La milpa (Figura 4) —del náhuatl *milpan* (de *milli*, “parcela sembrada”, y *pan*, “encima de”)— es uno de los principales agroecosistemas de origen mesoamericano. Se trata de un policultivo centrado en el maíz, el cual se acompaña de especies como el frijol y la calabaza para conformar la llamada “triada mesoamericana” (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [CONABIO], 2023). En la región Puebla-Tlaxcala, se destaca en las zonas cultivables el sistema Milpa Nahua, el cual considera la asociación de maíz, calabaza, frijol, quelite y maguey, este último sembrado dentro o fuera de la milpa (Valera et al., 2020).



Figura 4. La milpa.
<https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/sistemas-productivos/milpa>

Zanjas o cajetes y jagüeyes

Mediante la extracción de suelo, se construyen conjuntos de canales o zanja dispuestos a lo largo de las terrazas y junto a los bordos. Su función es interceptar la escorrentía y los sedimentos que descienden por la pendiente, concentrándolos en estos depósitos para su aprovechamiento (Figura 5). Estos cajetes no solo facilitan la acumulación e infiltración de agua en el suelo, sino que también concentran sedimentos fértiles. Al ser ricos en nutrientes, estos materiales son recolectados y reintroducidos en las zonas cultivables para mejorar la productividad (Gliessman, 2002; Pérez, 2012).

En algunas ocasiones el sistema *metepantle* considera la construcción de presas de acumulación de agua, conocidas como jagüeyes, donde se descarga y acumula el exceso de agua de lluvia proveniente de las zanjas o cajetes, cuando estas llegan a su máxima capacidad. El agua de lluvia almacenada por este sistema, en la década de 1960 y 1970 por algunas comunidades campesinas de Tlaxcala, era utilizada para actividades domésticas como el lavado de ropa y como abrevadero para el ganado; sin embargo, para 2012 el agua ya solo era utilizada como abrevadero para el ganado (Pérez, 2012).



Figura 5. Zanjas o cajetes en el sistema agroecológico *metepantle*.
Fotografía propia.

Bordos de tierra

Los bordos o muros de contención se forman a partir del establecimiento del maguey manso o maguey pulquero (*Agave salmiana*), aunque también pueden existir otras especies de magueyes (*Agave spp.*). Estos, en asociación con árboles frutales de origen nativo como el tejocote (*Crataegus mexicana*), el capulín (*Prunus capuli*), etc.; árboles frutales de especies introducidas como el durazno (*Prunus persica*), la pera (*Pyrus communis*) y el chabacano (*Prunus armeniaca*); árboles maderables de la región como el pino (*Pinus spp.*), sabino (*Juniperus deppeana*) y encino

(*Quercus spp.*); así como diferentes elementos naturales de tipo arbustivo, y en algunos casos el nopal (*Opuntia spp.*) (Donkin, 1979; González, 2014; Rojas, 1991; Wilken, 1987).

El maguey pulquero, la estrella principal

En el *metepantle* se destaca la presencia del maguey pulquero, el cual es de gran importancia para México, dado que el país es considerado como "Centro de Diversificación y Domesticación de *Agave spp.*", al contar con 159 especies de un total de 210, según datos de CONABIO (2020).

El maguey pulquero (*Agave salmiana*) posee dentro de sus características su capacidad de adaptación a condiciones de baja precipitación, heladas frecuentes y suelos de baja fertilidad, por lo cual es establecido en regiones del ACM en donde se presentan estas condiciones climáticas (Narváez et al., 2016). En la Figura 6 se observan las principales características del maguey pulquero (*Agave salmiana*), las cuales están directamente relacionadas con los principales beneficios que aporta al sistema agroecológico (Narváez et al., 2016).

Maguey pulquero (*Agave salmiana*)

Maguey pulquero, manso o de montaña.

Roseta: mide de 1.5 m a 3.4 m de altura y diámetro de hasta 5 m.

Hojas: anchas, fuertes, suculentas, color verde, ápices (punta de la hoja) largos, acuminados (finaliza en puntilla) y sigmoideos (en forma de s).

Espinas: grandes y anchas.

Inflorescencia: ramificada, de hasta 8 m de alto.

Floración: inicia de los 8 a 12 años de vida de la planta.

Reproducción: semilla e hijuelo.



Figura 6. Partes de la planta de maguey.
https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-El-maguey-y-sus-partes_fig3_311527355

Manejo: la producción de aguamiel y pulque, descrita por Cortés y Basurto (2005), se describe de la siguiente manera:

1. Se realiza la castración o extracción de la yema floral o cogollo antes de la floración.
2. Posteriormente, se inicia un periodo de reposo de la planta en campo durante 6 meses y hasta 2 años, tiempo en el que la planta concentra azúcares antes de la cosecha.
3. La cosecha consiste en el raspado o desgaste de la zona donde se encontraba el cogollo, formándose una cavidad en el centro, hacia la cual escurre la savia dulce de las hojas o aguamiel. Cada maguey puede producir entre 500 y 1,000 litros de aguamiel, en un periodo de algunos meses y varía en función del tamaño de la planta.
4. Para finalizar, el aguamiel se fermenta para la producción de pulque.

Beneficios del sistema agroecológico Metepantle

Los servicios ecosistémicos son referidos como todos los beneficios o servicios que la naturaleza provee a la humanidad (FAO, s.f.-c).

En función de lo anterior, algunos de los beneficios que el sistema agroecológico Metepantle provee son los siguientes:

Socioeconómicos

- Del maguey se obtienen fibras, que son utilizadas para la fabricación de distintas cuerdas, redes, collares y soportes para los animales, utensilios como agujas, elaborados a partir de sus espinas, y hojas de la penca o mixiotes utilizadas para sostener la carne que se prepara para el platillo con este mismo nombre (Moreno-Calles et al., 2013).

- Los árboles maderables proveen leña para ser utilizada como combustible o en su caso para producir carbón, el cual puede ser destinado a autoconsumo o comercializado (Pérez, 2012).
- Los quites del maguey, así como la madera de los árboles, se utilizan como vigas y postes de soporte en la construcción (Moreno-Calles et al., 2013).
- El maguey seco también es utilizado para la obtención de material combustible, por ejemplo, a partir de las pencas del maguey seco se obtienen los llamados *mesontetes* utilizados como material combustible por los campesinos de la región (Donkin, 1979; Moreno-Calles et al., 2013; Rojas, 1991; Wilken, 1987).
- La vegetación de los bordos funciona como límite o linderos entre los terrenos de los diferentes dueños (Narváez et al., 2016).
- Las pencas verdes del maguey, así como otros productos y/o subproductos del sistema de cultivo (plantas verdes o secas del maíz, malezas y rastrojos), también son utilizadas como forraje para algunos animales domésticos (Narváez et al., 2016).
- El sistema *metepantle*, al ser un sistema agroecológico de uso tradicional, es importante en el desarrollo y mantenimiento de la diversidad biocultural ya que "integra y recrea las cosmovisiones, los conocimientos, las prácticas y las reglas de uso" (Toledo, 2002; Simons y Leakey, 2004, como se citó en Moreno-Calles et al., 2013).
- (Narváez et al., 2016; Pérez, 2012). Específicamente, las amplias raíces superficiales y aglutinantes del maguey ayudan a prevenir la erosión y acumular humedad, así como también a soportar el bordo (Moreno-Calles et al., 2013; Pérez, 2012).
- La vegetación de los bordos se emplea como fuente de abono y nutrientes enriqueciendo el suelo con materia orgánica debido a la caída de ramas secas, hojarasca y frutos (Moreno-Calles et al., 2013; Pérez, 2012).
- En el sistema *metepantle*, los bordos y las zanjas, controlan el curso de la escorrentía. Esta infraestructura permite dirigir el agua de lluvia hacia zonas de almacenamiento estratégico, como los jagüeyes -práctica conocida como "cosecha de agua"- o, en su defecto, canalizar los excedentes hacia las barrancas (Narváez et al., 2016; Pérez, 2012).
- El agua almacenada en los depósitos o jagüeyes es aprovechada por la fauna doméstica y silvestre de la zona.
- Las hileras de magueyes y árboles también funcionan como cercas vivas que protegen a los cultivos y al suelo de la erosión causada por el viento (Narváez et al., 2016; Pérez, 2012).
- El sistema agroecológico apoya la protección y conservación de la biodiversidad (Pérez et al., 2017), ya que el maguey es el hábitat de muchos animales e insectos benéficos para el sistema, entre ellos algunos polinizadores como las abejas, murciélagos, colibríes, etc. (Narváez et al., 2016).

Agricultura

Ambientales

- La vegetación de los bordos (magueyes, árboles frutales y maderables, y plantas silvestres) favorece la formación y conservación del suelo, al evitar las pérdidas por erosión, aun en zonas con pendiente en el suelo, terrenos pedregosos o tepetates
- La vegetación de los bordos provee de diversos frutos como la manzana, durazno, tejocote, pera, etc.; de verduras en casos de presencia de nopal; y de bebidas como aguamiel y pulque provenientes del maguey (Moreno-Calles et al., 2013; Pérez et al., 2017).

- El maguey funciona como hábitat de distintas especies, en algunos casos consideradas como plagas, que son consumidas y comercializadas de manera local y regional, como son los gusanos blancos de maguey que se producen en temporada de secas, los gusanos rojos conocidos como *chiloquitl* que se producen en temporada de lluvias, y los gusanos amarillos que llevan nombre de nixtamal (Moreno-Calles et al., 2013).
- Las flores producidas por la planta del maguey son consumidas como verduras y sus tallos cocidos, denominados mezcals, también son consumidos por los productores (Moreno-Calles et al., 2013).
- Otros de los productos que pueden obtenerse de la planta del maguey, con ayuda de la biotecnología, y en función de la fase de crecimiento de la planta son: la producción de carbón activado, la producción de inulina (fibra que ayuda en la disminución de colesterol y triglicéridos), miel de agave, destilado de pulque, dulces, mermeladas, tostadas, prebióticos y probióticos, etc. (Narváez et al., 2016).
- Las barreras de maguey evitan el ingreso de la fauna nociva hacia los cultivos que se siembran al interior de los *pantles* (Narváez et al., 2016).
- En los alrededores de los magueyes se pueden encontrar algunos animales como ratoncillos, cacomixtles, armadillos, tejones, tuzas, víboras, lagartijas y hormigas, quienes juegan un papel importante en el control biológico de plagas de la zona (Narváez et al., 2016).
- Aprovechamiento de los diferentes productos del cultivo del sistema milpa como son el maíz, la calabaza, el frijol y los quelites, lo cual contribuye al sistema alimentario de la población (Valera et al., 2020).

Reconocimiento a la técnica tradicional del metepantle

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) define los Sistemas Importantes del Patrimonio Agrícola Mundial (SIPAM) como aquellos agroecosistemas que son habitados y gestionados por agricultores de las comunidades que mantienen una relación muy estrecha con su territorio.

Estos agroecosistemas están caracterizados por ser resilientes y contar con una gran biodiversidad, cultura y conocimientos tradicionales (FAO, s.f.-b).

En este contexto, en mayo de 2025 la FAO reconoció al sistema agrícola Metepantle de Tlaxcala como un SIPAM, dado que este sistema ha demostrado ser resiliente al cambio climático, conserva más de 40 razas originarias de maíz y al menos 30 variedades de verduras comestibles, además de proteger el suelo y permitir el sustento de la vida rural de regiones áridas y vulnerables del país.

Este reconocimiento al metepantle se suma al de la milpa maya de Yucatán y a las chinampas en Xochimilco como sistemas agrícolas, sostenibles, inclusivos y resilientes en México (FAO, 2025).

Problemática a la que se enfrenta el metepantle

A reserva de los grandes beneficios que representa el *metepantle*, tanto en el área ambiental como en la socioeconómica, actualmente se encuentra en riesgo de desaparecer debido a diferentes causas, siendo algunas de las más importantes las siguientes (Moreno-Calles et al., 2013):

- La extracción clandestina de la cutícula de las pencas de maguey para ser utilizada como *mixiote* en la cocina mexicana. Esta situación desincentiva a los campesinos que lo cultivan debido a que el maguey en poco tiempo muere y deben esperar alrededor de ocho años para aprovechar un nuevo maguey.

- La desaparición de las prácticas de manejo en el *metepantle* debido a la pérdida de interés de los campesinos, quienes prefieren migrar hacia las ciudades ya que representan un ingreso más estable a su trabajo.
- El uso de maquinaria agrícola en espacios en los que no se utilizaba, causando la eliminación de bordos y vegetación para dar paso principalmente a tractores.

Conclusiones

Los beneficios socioeconómicos y ambientales del sistema agroecológico Metepantle son múltiples, destacando el servicio ecosistémico de provisión de alimentos y agua, debido a la integración e interacción de los diferentes elementos que lo constituyen. Sin embargo, ante el riesgo de la pérdida del conocimiento de este sistema de agricultura tradicional, es necesario que sea difundido, conocido y reconocido por la sociedad y, en particular, por las diferentes personas que puedan participar en su conservación y/o restablecimiento, como las comunidades que habitan los valles altos del ACM, la academia, las instituciones gubernamentales, entre otros.

Este sistema de agricultura tradicional adquiere gran relevancia en las Áreas Naturales Protegidas del ACM, específicamente en las subzonas clasificadas como de uso tradicional, donde este tipo de técnicas agrícolas son compatibles con los programas de manejo de estas áreas de protección.

Conflicto de intereses

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia. Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Descargo de Responsabilidad (Inteligencia Artificial): Los autores declaran por la presente que NO se han utilizado tecnologías de IA generativa, tales como modelos de lenguaje grandes (ChatGPT, COPILOT, etc.) y generadores de texto a imagen, durante la redacción o edición de este manuscrito

Agradecimientos

A la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado (VIEP) de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por su apoyo en el desarrollo de la presente investigación.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por su apoyo en el trabajo de tesis de Doctorado en Ciencias Ambientales de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Referencias

- Álvarez-Duarte, M. del C., García-Moya, E., Suárez-Espinosa, J., Luna-Cavazos, M., y Rodríguez-Acosta, M. (2018). Conocimiento tradicional, cultivo y aprovechamiento del maguey pulquero en los municipios de Puebla y Tlaxcala. *Polibotánica*, 0(45), 205-222. <https://doi.org/10.18387/polibotanica>.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (25 de mayo de 2021). Qué nos aportan los agaves. https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/alimentos/que-nos-aportan/N_agaves
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (4 de abril de 2023). La milpa. Diversidad Natural y Cultural. <https://biodiversidad.gob.mx/diversidad/sistemas-productivos/milpa>
- Cortés, L., y Basurto, F. (2005). Agave salmiana Otto Ex Salm. Jardín Botánico, Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México. <http://www.ibiologia.unam.mx/gela/pp-1.html>
- Donkin, R. A. (1979). Agricultural terracing in the aboriginal new world. Wenner-Gren Foundation for Anthropological Research, University Arizona Press, Tucson.
- García, R. M., Galán, M., Cuevas, J. A., y Álvarez, R. (2020). Identificación y caracterización morfológica de agaves en sistemas agroforestales con metepantle en tierras campesinas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(4), 917–929. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i4.2468>
- Gliessman, S. R. (2002). Agroecología: Procesos ecológicos en agricultura sostenible. Turrialba, C.R.: CATIE
- González-Jácome, A. (2003). Cultura y agricultura: transformaciones en el agro mexicano. Universidad Iberoamericana.
- González-Jácome, A. (2014). Sistemas agrícolas en orografías complejas: las terrazas de Tlaxcala. *Perspectivas Latinoamericanas*, (11), 1-30.
- Moreno, A., Soto, M., Carriño, M., Palma, J., Moctezuma, S., Rosales, J., Montañez, P., Sosa, V., Ruenes, M., y López, W. (2020). Los Sistemas Agroforestales de México: Avances, experiencias, acciones y temas emergentes. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Moreno-Calles, A. I., Toledo, V. M., y Casas, A. (2013). Agroforestry systems of Mexico: A biocultural approach. *Botanical Sciences*, 91(4), 375–398. <https://doi.org/10.17129/botsci.419>
- Narváez, A. U., Martínez, T., y Jiménez, M. A. (2016). El cultivo de maguey pulquero: opción para el desarrollo de comunidades rurales del altiplano mexicano. *Revista de Geografía Agrícola*, (56), 33–44. <https://doi.org/10.5154/r.ga.2016.56.005>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2019). Soil erosion: the greatest challenge for sustainable soil management.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (22 de mayo de 2025). México suma su tercer SIPAM: el metepantle de Tlaxcala. <https://www.fao.org/mexico/noticias/detail-events/ru/c/1738161/#:~:text=El%20reconocimiento%20del%20metepantle%20como,parte%20del%20patrimonio%20agr%C3%ADcola%20mundial>.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (s.f.-a). Simposio Mundial sobre la Erosión del Suelo. <https://www.fao.org/about/meetings/soil-erosion-symposium/about-the-symposium/es/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (s.f.-b). Sistemas Importantes del Patrimonio Agrícola Mundial (SIPAM). <https://www.fao.org/giahs/es>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (s.f.-c). NSP - Biodiversidad y servicios de ecosistema. <https://www.fao.org/agriculture/crops/plan-thematique-du-site/theme/biodiversity/es/>
- Palerm, Á. (2008). Sistemas Agrícolas en Mesoamérica Contemporánea. En J. Palerm, (Coord.) Guía y lecturas para una primera práctica de campo (pp. 295-350). Universidad Autónoma de Querétaro.
- Pérez, J. M. (2012). Terrazas y metepantles: Manejo de tierra y agua en una comunidad en el altiplano mexicano. *Perspectivas Latinoamericanas*, (9), 99–111.
- Pérez, J. M., Moctezuma, S., Sales, J., Reyes, L., y Juan, J. I. (2017). Manejo del suelo en la agricultura tradicional de laderas en Tlaxcala y el valle de Toluca, México. En Universidad Autónoma Chapingo (Ed.), Patrimonio biocultural. Experiencias integradoras (pp. 79–99).
- Ríos, A. C., y Martínez, R. (2019). Manejo agroforestal del maguey y la agrobiodiversidad asociada. *Leisa Revista de Agroecología*, 35(4), 22–24.

- Rojas, T. (1991). La agricultura en la época prehispánica. En Comisión Nacional para la Cultura y las Artes (Ed.), *La Agricultura en Tierras Mexicanas desde sus Orígenes hasta Nuestros Días* (pp. 15–138). Grijalbo S.A. de C.V.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (3 de noviembre de 2020). Metepantle. Recuperado el 19 de marzo de 2026 de <https://www.facebook.com/Semarnatmx/photos/metepantli-metepantle-o-metepantle-puede-significar-pareddemagueyes-y-se-refiere/10160060670884918/>
- Narváez, A., Martínez, T., y Jiménez, M. (2016). El cultivo de maguey pulquero: opción para el desarrollo de comunidades rurales del altiplano mexicano. *Revista de Geografía Agrícola*, 33–44. <https://doi.org/10.5154/r.rga.2016.56.005>
- Valera, M. Á., Licona, E., Soni, M. E., Zúñiga, F. E., Urizar, L. P., García, D. A., Vega, M., Silveti, Á., Ramírez, L. A., Chavarín, Y., y Tenorio, M. G. (2020). Recuperación de la Milpa Nahua como estrategia para la recarga del acuífero a partir de la conservación de suelos y rehabilitación del Metepantle en comunidades indígenas de las zonas de montaña de la cuenca Alto Atoyac (Estados de Puebla y Tlaxcala), desde un enfoque intercultural, territorial y socio-ambiental. *Revista Latinoamericana El Ambiente y Las Ciencias*, 11, 85–92.
- Wilken, G. C. (1987). *Good Farmers: Traditional Agriculture Resources Management in México and Central America*. University of California Press, Ed.

Recepción: 09.12.2025

Revisión: 25.03.2026

Publicación: 08.05.2026

<https://orcid.org/0000-0002-9931-9294>

<https://orcid.org/0009-0004-1394-8172>

<https://orcid.org/0009-0004-9255-6467>

ENDOMETRIOSIS: POR QUÉ DUELE TANTO Y CÓMO SE ESTUDIA EN EL LABORATORIO

ENDOMETRIOSIS: WHY IT HURTS SO MUCH AND HOW IT IS STUDIED IN THE LAB.

Angélica Trujillo Hernández*¹

Nadinne Pérez Rivera ²

Naomi Polanco Castro ²

¹ Laboratorio de Bioquímica y Biología Molecular. Centro de Química. Instituto de Ciencias. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Edificio IC7. Ciudad Universitaria. Colonia San Manuel. Puebla. México.

² Licenciatura en Biomedicina, Facultad de Medicina, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Correos:

angelica.trujillo@correo.buap.mx*

nadinne.perezr@alumno.buap.mx

naomi.polanco@alumno.buap.mx

teléfono móvil: 2223251577

Resumen

La endometriosis es una enfermedad en la que tejido similar al revestimiento interno del útero crece fuera de él, por ejemplo, en los ovarios o en la cavidad abdominal. Este tejido responde a las hormonas del ciclo menstrual y se inflama de manera repetida, lo que provoca dolor pélvico intenso, menstruaciones incapacitantes, dolor durante las relaciones sexuales y dificultades para lograr un embarazo, con un impacto importante en el bienestar físico, emocional y económico. Se estima que alrededor del 10% de las mujeres en edad reproductiva la padecen, lo que equivale a cerca de 190 millones en el mundo y a más de siete millones en México. A pesar de ello, el diagnóstico suele retrasarse durante años, en parte por la normalización del dolor menstrual. En este artículo explicamos qué es la endometriosis y por qué no puede considerarse un simple “dolor de regla”, así como sus efectos en la vida diaria y la salud mental. También abordamos los retos para su diagnóstico y las opciones de tratamiento actuales. Finalmente, describimos cómo se estudia en el laboratorio mediante modelos experimentales —desde animales hasta organoides— que permiten comprender sus mecanismos y desarrollar mejores terapias.

Palabras clave: *Endometriosis; Dolor pélvico; Salud reproductiva; Modelos animales; Investigación biomédica.*

Abstract

Endometriosis is a disease in which tissue similar to the inner lining of the uterus grows outside it, for example, on the ovaries or within the abdominal cavity. This tissue responds to hormonal changes during the menstrual cycle and becomes repeatedly inflamed, leading to severe pelvic pain, debilitating menstruation, pain during sexual intercourse, and difficulties achieving pregnancy, with a significant impact on physical, emotional, and economic well-being. It is estimated that around 10% of women of reproductive age are affected, corresponding to nearly 190 million worldwide and more than seven million in Mexico. Despite this, diagnosis is often delayed for years, partly due to the normalization of menstrual pain. In this article, we explain what endometriosis is and why it cannot be considered simply “menstrual pain,” as well as its effects on daily life and mental health. We also address current challenges in diagnosis and available treatment options. Finally, we describe how endometriosis is studied in the laboratory using experimental models—from animals to organoids—which help elucidate disease mechanisms and support the development of more effective therapies.

Keywords: *Endometriosis; Pelvic pain; Reproductive health; Animal models; Biomedical research.*

Introducción

¿Qué es la endometriosis?

La endometriosis es una enfermedad en la que tejido similar al endometrio, es decir, al revestimiento interno del útero, aparece donde no debería: en los ovarios, en la superficie del peritoneo o incluso entre el recto y la vagina. No se trata de un trastorno nuevo ni raro. Fue descrita por primera vez en el siglo XIX, pero durante décadas muchas mujeres fueron etiquetadas como “histéricas” o se les dijo que su dolor era parte normal de la menstruación. Hoy sabemos que la endometriosis es un problema complejo que involucra hormonas, sistema inmune, nervios y el microambiente de la cavidad abdominal.

En la práctica, esto se traduce en síntomas que se repiten de mujer a mujer: dolor pélvico crónico, reglas muy dolorosas que pueden impedir ir a la escuela o al trabajo, molestias al tener relaciones sexuales y dificultades para embarazarse. A pesar de que existen distintas formas de endo-

metriosis —como lesiones superficiales en el peritoneo, quistes en los ovarios o focos profundos que invaden otros tejidos—, el tamaño de las lesiones no siempre coincide con la intensidad del dolor ni con el impacto en la fertilidad. Por si fuera poco, todavía no contamos con una prueba sencilla en sangre u orina que confirme el diagnóstico, y en muchos casos sigue siendo necesario recurrir a estudios de imagen especializados o incluso a la laparoscopia.

En este contexto, la investigación básica y la clínica han recurrido a modelos animales y sistemas *in vitro* para entender mejor qué ocurre en el organismo y cómo podríamos intervenir de manera más temprana y efectiva. A lo largo de este artículo vamos hilando la historia clínica de la endometriosis con el trabajo que se realiza en el laboratorio, para mostrar por qué esta enfermedad es también un tema de justicia social y de salud pública.

Panorama epidemiológico: mundo y México

Cuando se habla de endometriosis, a veces se piensa en un padecimiento “poco frecuente” o exclusivo de ciertos hospitales de alta especialidad, pero las cifras cuentan otra historia. Se estima que alrededor del 10% de las mujeres en edad reproductiva presentan endometriosis, lo que equivale a unos 190 millones de mujeres en el mundo (Organización Mundial de la Salud, 2023, 2024).

Informes recientes de la Organización Mundial de la Salud sitúan la prevalencia en un rango de 6 a 13%, dependiendo del diseño de los estudios y de las técnicas diagnósticas empleadas (World Health Organization, 2023; World Health Organization Bulletin, 2024).

Más allá del número exacto, la carga global de la enfermedad —medida en años vividos con dolor y limitaciones— ha ido en aumento, en

parte porque ahora se reconoce mejor el problema (Boletín de la Organización Mundial de la Salud, 2024).



Figura 1. Síntomas de la endometriosis. Imagen diseñada en Bio-Render (<https://www.biorender.com/>).

En México, los datos disponibles apuntan en la misma dirección. La Secretaría de Salud y el CENETEC estiman que una de cada diez mujeres en edad reproductiva podría padecer endometriosis, lo que se traduce en más de siete millones de mexicanas potencialmente afectadas (Secretaría de Salud, 2023; Secretaría de Salud–CENETEC, 2023). Diversos estudios hospitalarios muestran que, entre las mujeres que consultan por infertilidad o dolor pélvico, la proporción con endometriosis es todavía mayor (Horne & Missmer, 2022; De Corte et al., 2025). Sin embargo, el país no cuenta aún con encuestas epidemiológicas específicas, de modo que buena parte de la información proviene de series de casos, registros clínicos y extrapolaciones a partir de datos internacionales (World Health Organization, 2023; Secretaría de Salud–CENETEC, 2023).

A esta falta de datos poblacionales se suma un problema que los pacientes conocen bien: el diagnóstico tardío. En distintos países, incluido México, se han documentado demoras de entre 7 y 10 años desde los primeros síntomas hasta que se confirma la enfermedad (De Corte et al., 2025; Li et al., 2025). Durante ese tiempo, muchas mujeres pasan por múltiples consultas, estudios e incluso cirugías con extirpaciones parciales, lo que agrava no solo el dolor físico, sino también la ansiedad, la incertidumbre y el impacto laboral y económico (World Health Organization Bulletin, 2024; Secretaría de Salud, 2023). Entender cuántas mujeres viven con endometriosis y por qué tardamos tanto en detectarla no es un ejercicio meramente estadístico: es el punto de partida para diseñar mejores políticas de salud, campañas de información y líneas de investigación.



Figura 2. Prevalencia de la endometriosis a nivel mundial y en México. Con base en información de la Secretaría de Salud, 2023.

¿Por qué duele tanto la endometriosis?

Hoy sabemos que la endometriosis no tiene una sola causa. Más bien, es el resultado de varios procesos que ocurren al mismo tiempo y se refuerzan entre sí: inflamación, cambios hormonales, alteraciones del sistema inmune y la forma en que el sistema nervioso procesa el dolor (Horne & Missmer, 2022). Una de las primeras explicaciones que se propusieron fue la llamada menstruación retrógrada. Durante

la menstruación, parte del tejido del endometrio puede viajar en sentido contrario a través de las trompas y llegar a la cavidad abdominal. En algunas mujeres, estos fragmentos logran adherirse, sobrevivir y formar lesiones. Sin embargo, este fenómeno ocurre en muchas mujeres que nunca desarrollan la enfermedad, por lo que no basta para explicarla por completo (Horne & Missmer, 2022).

La diferencia parece estar en lo que ocurre después. En personas con endometriosis, el entorno dentro de la cavidad abdominal favorece que ese tejido “fuera de lugar” se implante y crezca. El sistema inmune, que normalmente debería eliminarlo, no responde de la misma manera: algunas células pierden capacidad para destruirlo, mientras que otras liberan sustancias que promueven inflamación y formación de nuevos vasos sanguíneos. Esto crea un ambiente que facilita la persistencia de las lesiones (Garmendia et al., 2025).

Además, se ha observado que el líquido peritoneal puede acumular hierro y productos derivados del sangrado cíclico, lo que favorece la generación de especies reactivas de oxígeno y el estrés oxidativo. Estos procesos contribuyen al daño tisular y perpetúan la inflamación, la formación de nuevos vasos y el dolor (Ni&Li, 2024; Kobayashi et al., 2023).

A esto se suman cambios hormonales. Las lesiones de endometriosis pueden producir sus propios estrógenos, lo que alimenta su crecimiento. Al mismo tiempo, muestran una menor respuesta a la progesterona, una hormona que normalmente ayuda a controlar la proliferación del tejido. Este desequilibrio favorece que la enfermedad se mantenga activa a lo largo del tiempo (Bulun et al., 2019).

Otro elemento clave es el dolor. Las lesiones no solo inflaman el tejido, sino que también desarrollan nuevas fibras nerviosas y liberan moléculas que sensibilizan al sistema nervioso.

Con el tiempo, esto puede hacer que el dolor se vuelva más intenso y persistente, incluso cuando las lesiones son pequeñas. Por eso, en la endometriosis no siempre hay una relación directa entre el tamaño de las lesiones y la intensidad del dolor (Hey-Cunningham et al., 2013).

En conjunto, estos procesos ayudan a entender por qué la endometriosis es una enfermedad compleja y por qué su manejo requiere un enfoque que vaya más allá de una sola causa o tratamiento.

¿Cómo se diagnostica la endometriosis?

El camino hacia el diagnóstico de endometriosis empieza, casi siempre, con escuchar la historia del paciente. Hoy se reconoce que no es necesario “probar” la enfermedad con una cirugía desde el inicio: el punto de partida es una buena entrevista clínica, en la que se exploran síntomas como dolor pélvico crónico, menstruaciones muy dolorosas, dolor al tener relaciones sexuales, dolor cíclico en otras zonas y dificultades para embarazarse (Horne & Missmer, 2022; Secretaría de Salud–CENETEC, 2023). La exploración pélvica, realizada por personal médico entrenado, puede aportar pistas, aunque no siempre permite ver la enfermedad en etapas iniciales. En cuanto a estudios, las guías internacionales y nacionales recomiendan una estrategia “clínico-radiológica”. El ultrasonido transvaginal es la prueba de primera línea para identificar quistes de endometriosis en los ovarios (endometriomas) (Becker et al., 2022; Secretaría de Salud–CENETEC, 2023).

La resonancia magnética se reserva para casos complejos, por ejemplo, cuando se sospecha compromiso de intestino, vejiga, uréteres o diafragma, o cuando el ultrasonido no es concluyente (Becker et al., 2022). Los marcadores en sangre como el CA-125 no se recomiendan como prueba de rutina, porque son poco específicos y se elevan también en otras condiciones (Horne & Missmer, 2022). Durante mucho tiempo se demostró que el “estándar de oro” para confirmar la endometriosis era la laparoscopia con biopsia. Hoy, tanto las guías de la Sociedad Europea de Reproducción Humana y Embriología (ESHRE) como la Guía de Práctica Clínica de CENETEC recomiendan reservar este procedimiento para situaciones seleccionadas: cuando el tratamiento médico no funciona, hay sospecha de enfermedad profunda o se requiere una intervención quirúrgica por otras razones (Becker et al., 2022; Secretaría de Salud–CENETEC, 2023). Esta transición hacia un diagnóstico basado en síntomas y estudios de imagen busca evitar cirugías innecesarias y acortar el tiempo entre los primeros síntomas y el inicio del tratamiento (De Corte et al., 2025; Li et al., 2025).

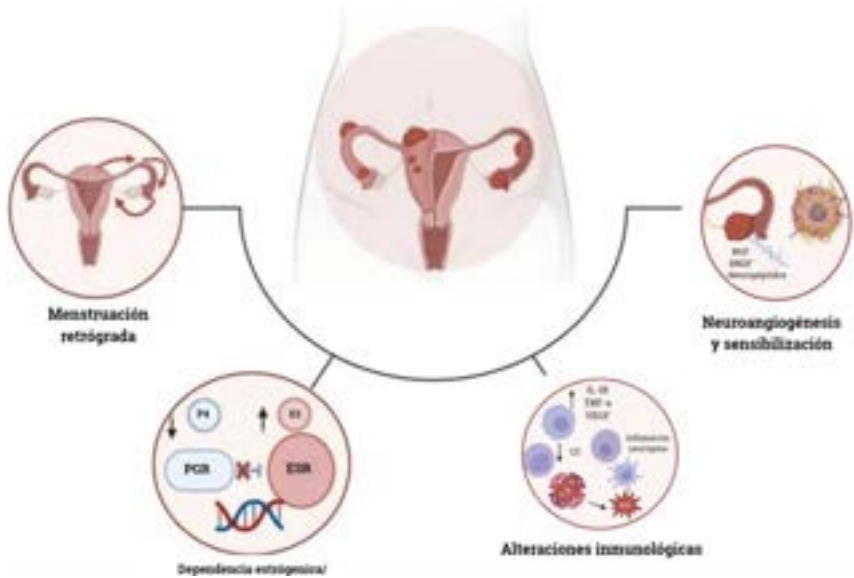


Figura 3. Fisiopatología de la endometriosis: mecanismos involucrados en su desarrollo. Imagen diseñada en Bio-Render (<https://www.biorender.com/>) con base en información de Horne & Missmer, 2022.

¿Por qué necesitamos modelos experimentales?

Entender a fondo la endometriosis solo con la información que obtenemos en la clínica es muy difícil. No siempre es posible tomar muestras de tejido, seguir la evolución de las lesiones en el tiempo o probar de manera controlada nuevos tratamientos en pacientes. Por eso, la investigación recurre a modelos experimentales: animales de laboratorio, cultivos de células, “miniúteros” u otros sistemas que permiten estudiar, paso a paso, qué ocurre en la enfermedad y cómo podríamos intervenir.

Estos modelos sirven para varias cosas: explorar mecanismos biológicos, identificar posibles blancos terapéuticos, probar fármacos antes de llegar a ensayos clínicos y buscar biomarcadores que algún día permitan diagnósticos menos invasivos. La validez de cada modelo depende de la especie, la forma en que se induce la enfermedad, el sitio donde se forman las lesiones, el estado hormonal y las variables que se miden (Burns et al., 2022; D’Hooghe et al., 2009; Tirado-González et al., 2010).

Primates no humanos: el modelo más parecido a la enfermedad humana

Entre todos los modelos animales, los primates no humanos —como el macaco rhesus o el babuino— son los que más se parecen a la endometriosis humana. Estas especies menstrúan de manera espontánea, comparten ciclos hormonales similares a los de las mujeres y pueden desarrollar endometriosis de forma natural, sin necesidad de intervención experimental (D’Hooghe et al.,

2009; Tirado-González et al., 2010). Esto permite estudiar la evolución de la enfermedad en condiciones muy cercanas a la realidad clínica: cómo aparecen las lesiones, cómo cambian con el tiempo, qué pasa cuando se interviene quirúrgicamente o cuando se prueban ciertos medicamentos. Sin embargo, trabajar con primates implica retos importantes: costos muy

elevados, colonias pequeñas, tiempos largos de seguimiento y, sobre todo, exigencias éticas muy estrictas (D'Hooghe et al., 2009). Por ello,

aunque ofrecen una fidelidad excepcional, solo unos cuantos centros en el mundo pueden utilizarlos de manera rutinaria.

Roedores: modelos versátiles para entender mecanismos y probar tratamientos

Por razones éticas, económicas y logísticas, la mayoría de los estudios experimentales se realizan en roedores, principalmente ratas y ratones. Estos animales no menstrúan de forma natural, lo

que podría considerarse una desventaja, pero son muy útiles para estudiar mecanismos concretos y evaluar la respuesta a fármacos en condiciones controladas (Burns et al., 2022; Tejada et al., 2023).

Modelos homólogos con tejido de ratas o ratones

En los modelos homólogos se utiliza tejido uterino de la misma especie: fragmentos de útero o de endometrio se trasplantan a la cavidad abdominal, al peritoneo o a los ovarios, donde forman lesiones similares a las de la endometriosis. El resultado final depende de varios facto-

res: la cepa del animal, el tamaño del injerto, el sitio exacto donde se coloca, el tiempo de seguimiento y el estado hormonal, entre otros (Burns et al., 2022, 2025). Estos modelos son relativamente económicos y flexibles, lo que permite hacer estudios con muchos animales,

probar diferentes dosis de medicamentos, explorar variantes genéticas o evaluar la participación de ciertas vías inflamatorias. Justamente por esa versatilidad, el proyecto EPHeCt de la World Endometriosis Research Foundation ha

propuesto estándares para armonizar cómo se diseñan y reportan los modelos en roedores, de modo que los resultados puedan compararse entre laboratorios (Burns et al., 2025; World Endometriosis Research Foundation, 2025).

Modelos heterólogos: tejido humano en ratones

Otra estrategia consiste en implantar pequeños fragmentos de endometrio humano —normal o provenientes de lesiones de endometriosis— en ratones inmunodeficientes. En estos modelos heterólogos, el tejido humano crece en un organismo vivo, se vasculariza, responde a hormonas y fármacos, lo que acerca el modelo a la complejidad biológica de la enfermedad real (Hull et al., 2025; Marr et al., 2025).

Su principal limitación es que, para evitar el rechazo, estos ratones tienen sistemas inmunes muy debilitados o ausentes. Esto restringe el estudio de la respuesta inmune y de algunos aspectos del dolor, que son fundamentales en la endometriosis (Hull et al., 2025; Gruber & Mechsner, 2021). Por ello se usan sobre todo para estudiar el comportamiento del tejido humano y para probar terapias dirigidas a moléculas específicas.

El "ratón menstruante"

Para acercarse más al componente menstrual, se ha desarrollado un modelo conocido como "ratón menstruante". No se trata de una cepa especial, sino de un protocolo experimental en el que se induce un ciclo pseudogestacional y, posteriormente, una menstruación verdadera en ratones de laboratorio.

Esto permite estudiar, de forma controlada, procesos como la decidualización, el desprendimiento del tejido y la reparación del endometrio, además de su relación con inflamación, dolor y angiogénesis (Howe et al., 2025; Tejada et al., 2023). Aunque este modelo no reproduce toda la complejidad clínica de la endometriosis, se ha convertido en

una herramienta valiosa para explorar situaciones específicas y para complementar la información que brindan otros modelos. Paralelamente, se ha desarrollado todo un conjunto de pruebas con-

ductuales en roedores —desde la “grimace scale” hasta pruebas de hipersensibilidad— para medir el dolor de manera más objetiva y reproducible (Gruber & Mechsner, 2021; Tejada et al., 2023).

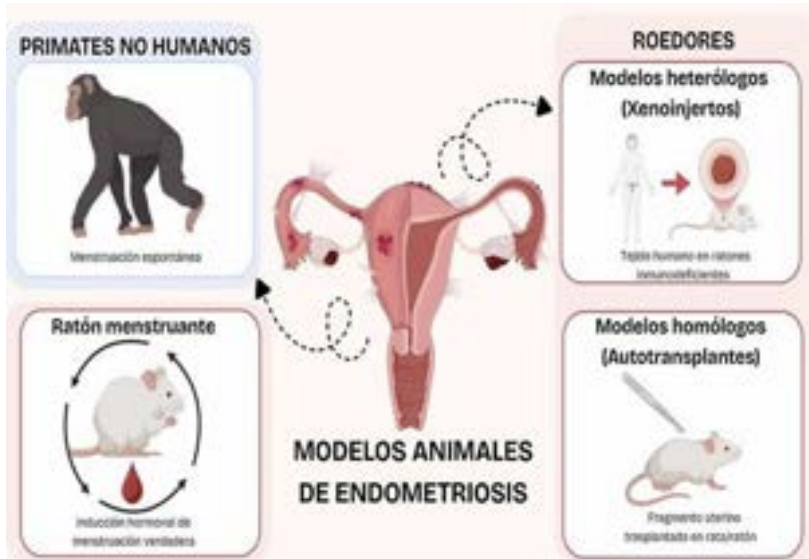


Figura 4. Modelos animales de endometriosis: primates no humanos y roedores.

Imagen diseñada en Bio-Render (<https://www.biorender.com/>).

Organoides y “órganos en chip”: minilaboratorios de endometrio

Además de los modelos animales, han surgido plataformas que utilizan directamente células humanas en el laboratorio. Los organoides son microestructuras tridimensionales que se forman a partir de células madre del endometrio o de lesiones de endometriosis, y que recrean algunas funciones del tejido real: organización glandular, respuesta hormonal, cambios en la expresión génica, entre otras (Marr et al., 2025).

Estos “miniúteros” permiten estudiar procesos muy específicos, probar rápidamente diferentes fármacos y reducir el uso de animales, con ventajas claras en términos de ética, costos y control experimental. Sin embargo, no incluyen todos los elementos de un organismo vivo: carecen de la interacción completa con nervios, vasos, sistema inmune u otros órganos, por lo que se

consideran modelos parciales que deben complementarse con otras aproximaciones (Marr et al., 2025). Los sistemas “organ-on-chip”, por su parte, son dispositivos microfluídicos donde se combinan células humanas con flujos controlados de nutrientes y señales mecánicas.

En endometriosis, pueden incluir tejido endometrial junto con células inmunes, endoteliales o neuronas sensoriales, para estudiar fenómenos como inflamación, formación de vasos y señalización del dolor en un entorno más cercano al cuerpo humano que un cultivo tradicional (Yan et al., 2023). Aunque esta tecnología todavía es costosa y requiere infraestructura especializada, se perfila como una herramienta poderosa para reducir la dependencia de modelos animales y avanzar hacia una investigación más traslacional.

Tabla 1. Comparativa entre organoides y órganos-en-chip: características, aplicaciones, ventajas y limitaciones para el estudio de la endometriosis.

	Organoides	Órganos-en-chip
Definición	Mini-órganos tridimensionales cultivados in vitro	Sistemas que combinan células humanas con flujos controlados para imitar funciones fisiológicas
Fuente celular	Células madre o tejido endometrial	Células humanas específicas integradas en microchips
Estructura	3D autoorganizada	Dispositivo microfluídico con canales
Aplicaciones	Estudio del desarrollo, interacciones célula-célula, enfermedades complejas como la endometriosis	Ensayo de fármacos, toxicología, modelado de órganos conectados ("human-on-a-chip")
Ventajas	Reproducen arquitectura y heterogeneidad celular	Simulación de vascularización, control del entorno fisiológico y medición precisa de variables
Limitaciones	Falta de vascularización y conexión con otros tejidos	Costo elevado y falta de estandarización

Elaborada con base en información de Marr et al., 2025 y Yan et al., 2023.

En los últimos años, la comunidad científica también ha buscado que los estudios sobre endometriosis sean más comparables y útiles entre distintos laboratorios. Iniciativas internacionales, como el proyecto EPHeC de la World Endometriosis Research Foundation, proponen guías para estandarizar tanto la recolección de datos clínicos como el diseño de modelos experimentales (Burns et al., 2025; World Endometriosis Research Foundation, 2025). Esto permite que los resultados puedan contrastarse con mayor facilidad y contribuyan de forma más sólida al avance del conocimiento. Al mismo tiempo, la investigación en este campo se desarrolla bajo principios éticos cada vez más estrictos. En el caso de los modelos animales, se siguen las llamadas 3R: reemplazar el uso de animales cuando existen alternativas, reducir el número necesario y refinar los procedimientos para disminuir el sufrimiento. En modelos más complejos, como los primates no humanos, las regulaciones son aún más rigurosas y requieren una evaluación detallada de los beneficios científicos frente a los riesgos (D'Hooghe et al., 2009; Lin et al., 2024).

Este enfoque busca que la investigación en endometriosis sea no solo científicamente sólida, sino también responsable, alineando el avance del conocimiento con el respeto hacia los seres vivos.

Reflexiones finales

La endometriosis es mucho más que un “dolor de regla”: es una enfermedad inflamatoria crónica, dependiente de estrógenos, que afecta a millones de mujeres y tiene consecuencias en la fertilidad, la salud mental y la vida cotidiana. Durante años, su impacto ha sido subestimado, en parte por la normalización del dolor menstrual, lo que contribuye a diagnósticos tardíos y tratamientos insuficientes.

Hoy se entiende como un problema complejo en el que interactúan factores hormonales, inmunológicos, inflamatorios y nerviosos. Este cambio de perspectiva ha permitido avanzar hacia estrategias diagnósticas menos invasivas y tratamientos más integrales, que no solo buscan eliminar lesiones, sino mejorar la calidad de vida.

En este contexto, los modelos experimentales — desde animales de laboratorio hasta organoides y sistemas “organ-on-chip” — son herramientas clave para comprender los mecanismos de la enfermedad y desarrollar nuevas terapias. Fortalecer la investigación, junto con una mejor comunicación pública, es fundamental para reconocer a tiempo la enfermedad y reducir el impacto que tiene en la vida de quienes la padecen.

Conflicto de intereses

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia. Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Descargo de Responsabilidad (Inteligencia Artificial) Los autores declaran por la presente que NO se han utilizado tecnologías de IA generativa, tales como modelos de lenguaje grandes (ChatGPT, COPILOT, etc.) y generadores de texto a imagen, durante la redacción o edición de este manuscrito.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, por el financiamiento de los proyectos del Cuerpo Académico en Neuroendocrinología BUAP-CA-288, periodo 2024-2026.

Referencias

- Becker, C. M., Bokor, A., Heikinheimo, O., Horne, A., Jansen, F., Kiesel, L., King, K., Kvaskoff, M., Nap, A., Petersen, K., Saridogan, E., Tomassetti, C., van Hanegem, N., Vulliamos, N., Vermeulen, N., & ESHRE Endometriosis Guideline Group. (2022). ESHRE guideline: Endometriosis. *Human Reproduction Open*, 2022(2), hoac009. <https://doi.org/10.1093/hropen/hoac009>
- Bulun, S. E., Yilmaz, B. D., Sison, C., Miyazaki, K., Bernardi, L., Liu, S., Kohlmeier, A., Yin, P., Milad, M., & Wei, J. (2019). Endometriosis. *Endocrine Reviews*, 40(4), 1048–1079. <https://doi.org/10.1210/er.2018-00242>
- Burns, K. A., Pearson, A. M., Slack, J. L., Por, E. D., Scribner, A. N., Eti, N. A., & Burney, R. O. (2022). Endometriosis in the mouse: Challenges and progress toward a "best fit" murine model. *Frontiers in Physiology*, 12, 806574. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.806574>
- Burns, K. A., Peterse, D., Appleyard, C. B., Chandler, R., Guo, S. W., Pearson, A., Persoons, E., Anglesio, M. S., Rogers, M. S., Sharpe-Timms, K. L., Vriens, J., McAllister, S. L., Dodds, K. N., Cousins, F. L., Hummelshoj, L., Missmer, S. A., Bruner-Tran, K. L., & Greaves, E. (2025). WERF Endometriosis Phenome and Biobanking Harmonisation Project for Experimental Models in Endometriosis Research (EPHect-EM-Homologous): Homologous rodent models. *Molecular Human Reproduction*, 31(3), gaaf021. <https://doi.org/10.1093/molehr/gaaf021>
- De Corte, P., Klinghardt, M., von Stockum, S., & Heinemann, K. (2025). Time to diagnose endometriosis: Current status, challenges and regional characteristics—A systematic literature review. *BJOG: An International Journal of Obstetrics and Gynaecology*, 132(2), 118–130. <https://doi.org/10.1111/1471-0528.17973>
- D'Hooghe, T. M., Kyama, A. M., Chai, D., Fassbender, A., Vodolazkaia, A., Bokor, A., & Mwenda, J. M. (2009). Nonhuman primate models for translational research in endometriosis. *Reproductive Sciences*, 16(2), 152–161. <https://doi.org/10.1177/1933719108322430>
- Endometriosis México. (s.f.). Endometriosis México. <https://endometriosismexico.com/>
- Garmendia, J. V., De Sanctis, C. V., Hajdúch, M., & De Sanctis, J. B. (2025). Endometriosis: An immunologist's perspective. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(11), 5193. <https://doi.org/10.3390/ijms26115193>
- Gruber, T. M., & Mechsner, S. (2021). Pathogenesis of endometriosis: The origin of pain and subfertility. *Cells*, 10(6), 1381. <https://doi.org/10.3390/cells10061381>
- Hey-Cunningham, A. J., Peters, K. M., Zevallos, H. B., Berbic, M., Markham, R., & Fraser, I. S. (2013). Angiogenesis, lymphangiogenesis and neurogenesis in endometriosis. *Frontiers in Bioscience (Elite Edition)*, 5(3), 1033–1056. <https://doi.org/10.2741/e682>
- Horne, A. W., & Missmer, S. A. (2022). Pathophysiology, diagnosis, and management of endometriosis. *BMJ*, 379, e070750. <https://doi.org/10.1136/bmj-2022-070750>
- Howe, C. A., Coté, J. J., Stoos, C. T., Hallgren, J. J., Bredehoeft, M. R., & Gelineau-van Waes, J. B. (2025). Induction of endometriosis in a menstruating mouse model. *Journal of the American Association for Laboratory Animal Science*, 64(4), 1–15. <https://doi.org/10.30802/AALAS-JAALAS-24-160>
- Hull, M. L., Gomez, R., Nothnick, W. B., Gruemmer, R., Burns, K. A., Johan, M. Z., Land, I. R., Missmer, S. A., Hummelshoj, L., Greaves, E., Bruner-Tran, K. L., & EPHeC Experimental Models Working Group. (2025). WERF EPHeC-EM-Heterologous: Heterologous rodent models. *Molecular Human Reproduction*, 31(3), gaaf022. <https://doi.org/10.1093/molehr/gaaf022>
- Kobayashi, H., Yoshimoto, C., Matsubara, S., Shigetomi, H., & Imanaka, S. (2023). Endometriosis-related infertility and ferroptosis. *Diagnostics*, 13(11), 1926. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13111926>
- Li, W., Feng, H., & Ye, Q. (2025). Factors contributing to delayed diagnosis of endometriosis: A systematic review and meta-analysis. *Frontiers in Medicine*, 12, 1576490. <https://doi.org/10.3389/fmed.2025.1576490>
- Lin, T., Allaire, C., As-Sanie, S., Stratton, P., Vincent, K., Adamson, G. D., Arendt-Nielsen, L., Bush, D., Jansen, F., Longpre, J., Rombauts, L., Shah, J., Toussaint, A., Hummelshoj, L., Missmer, S. A., Yong, P. J., & WERF EPHeC Physical Examination Working Group (2024). World Endometriosis Research Foundation Endometriosis Phenome and Biobanking Harmonization Project: V. Physical examination standards in endometriosis research. *Fertility and sterility*, 122(2), 304–315. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2024.03.007>

- Marr, E. E., Gnecco, J. S., Missmer, S. A., Hawkins, S. M., Osteen, K. G., Hummelshoj, L., Greaves, E., Bruner-Tran, K. L., & EPHeCT Experimental Models Working Group (2025). WERF Endometriosis Phenome and Biobanking Harmonisation Project for Experimental Models in Endometriosis Research (EPHeCT-EM-Organoids): endometrial organoids as an emerging technology for endometriosis research. *Molecular human reproduction*, 31(3), gaaf024. <https://doi.org/10.1093/molehr/gaaf024>
- Ni, C., & Li, D. (2024). Ferroptosis and oxidative stress in endometriosis: A systematic review. *Medicine*, 103(11), e37421. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000037421>
- Secretaría de Salud. (2023). En México, una de cada 10 mujeres en edad reproductiva puede padecer endometriosis. <https://www.gob.mx/salud/prensa/068-en-mexico-una-de-cada-10-mujeres-en-edad-reproductiva-puede-padecer-endometriosis>
- Secretaría de Salud – CENETEC. (2023). Guía de práctica clínica: Diagnóstico y tratamiento de la endometriosis. <https://www.cenetec-difusion.com/CMGPC/SS-207-23/ER.pdf>
- Tejada, M. A., Antunez, C., Nunez-Badinez, P., De Leo, B., Saunders, P. T., Vincent, K., Cano, A., Nagel, J., & Gomez, R. (2023). Rodent animal models of endometriosis-associated pain. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(3), 2422. <https://doi.org/10.3390/ijms24032422>
- Tirado-González, I., Barrientos, G., Tariverdian, N., Arck, P. C., García, M. G., Klapp, B. F., & Blois, S. M. (2010). Animal models for the study of a complex disease. *Journal of Reproductive Immunology*, 86(2), 141–147. <https://doi.org/10.1016/j.jri.2010.05.001>
- World Endometriosis Research Foundation (WERF). (2025). SOPs para modelos experimentales homólogos en roedores. <https://academic.oup.com/molehr/article/8193445>
- World Health Organization Bulletin. (2024). Endometriosis: Disease mechanisms and health disparities. <https://cdn.who.int/media/docs/default-source/bulletin/online-first/blt.24.292660.pdf>
- World Health Organization. (2023, March 24). Endometriosis. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/endometriosis>
- Yan, J., Wu, T., Zhang, J., et al. (2023). Revolutionizing the female reproductive system research using microfluidic chip platform. *Journal of Nanobiotechnology*, 21, 490. <https://doi.org/10.1186/s12951-023-02258-7>

Recepción: 11.12.2025

Revisión: 30.03.2026

Publicación: 08.05.2026

<https://orcid.org/0000-0003-0380-2917>

<https://orcid.org/0000-0002-0655-1503>

INMUNIZACIÓN CONTRA LA TUBERCULOSIS: A 100 AÑOS DE LA BCG

IMMUNIZATION AGAINST TUBERCULOSIS: 100 YEARS AFTER BCG

Andrea Monserrat Negrete Paz^{1*}
Ma. Soledad Vázquez Garcidueñas¹

¹ División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ciencias
Médicas y Biológicas
"Dr. Ignacio Chávez", Universidad Michoacana de San Nicolás
de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México.

Correos
andrea.negrete@umich.mx
soledad.vazquez@umich.mx

Resumen

Cada día más de 30,000 enferman de tuberculosis en el mundo. Esta enfermedad, que muchos creen del pasado, sigue cobrando 1,2 millones de vidas al año en pleno siglo XXI. La única vacuna disponible, la BCG, tiene 100 años de antigüedad y, aunque protege bien a los niños pequeños, falla sistemáticamente en adolescentes y adultos. ¿Por qué hemos esperado un siglo por nuevas vacunas? El reporte mundial de la tuberculosis 2025 de la Organización Mundial de la Salud (OMS) muestra un panorama inédito: 18 vacunas candidatas están siendo probadas en humanos en este momento. Algunas buscan prevenir la infección, otras evitar que resurja en personas ya curadas, e incluso hay propuestas para mejorar los tratamientos actuales. Este artículo explora por qué ha sido tan difícil desarrollar nuevas vacunas contra tuberculosis: *Mycobacterium tuberculosis* es una bacteria extraordinariamente compleja que desafía nuestro sistema inmune de formas que aún no comprendemos completamente; los modelos animales han fallado repetidamente en predecir qué funciona en humanos; y probar una vacuna requiere estudios con decenas de miles de personas durante años. Entre los candidatos más prometedores destacan M72/AS01E, que según estudios recientes, logró proteger a la mitad de las personas vacunadas; MTBVAC, diseñada directamente con la bacteria con muchos más componentes que BCG; y vacunas de ARN mensajero, la misma tecnología que revolucionó la lucha contra COVID-19. Después de un siglo de espera, varias vacunas con estrategias diferentes podrían finalmente cambiar la historia de la tuberculosis.

Palabras clave: *Tuberculosis, vacunas, BCG, M72/AS01E, MTBVAC, prevención, Mycobacterium tuberculosis, salud pública.*

Abstract

Every day, more than 30,000 people fall ill with tuberculosis worldwide. This disease, which many believe belongs to the past, continues to claim 1.2 million lives annually in the 21st century. The only available vaccine, BCG, is 100 years old and, while it protects young children well, systematically fails in adolescents and adults. Why have we waited a century for new vaccines? The 2025 World Health Organization (WHO) Global Tuberculosis Report shows an unprecedented landscape: 18 vaccine candidates are currently being tested in humans. Some seek to prevent infection, others aim to prevent the disease from reemerging in already cured individuals, and there are even proposals to improve current treatments. This article explores why developing new tuberculosis vaccines has been so difficult: *Mycobacterium tuberculosis* is an extraordinarily complex bacterium that challenges our immune system in ways we still do not fully understand; animal models have repeatedly failed to predict what works in humans; and testing a vaccine requires studies with tens of thousands of people over years. Among the most promising candidates are M72/AS01E, which, according to recent studies, achieved protection in half of vaccinated individuals; MTBVAC, designed directly with the bacterium and with many more components than BCG; and messenger RNA vaccines, the same technology that revolutionized the fight against COVID-19. After a century of waiting, several vaccines with different strategies could finally change tuberculosis history.

Keywords: *Tuberculosis, vaccines, BCG, M72/AS01E, MTBVAC, prevention, Mycobacterium tuberculosis, public health*

La tuberculosis: una amenaza persistente

La tuberculosis no es una reliquia del pasado. En 2024, 10.7 millones de personas enfermaron y 1.23 millones murieron por esta causa. Para poner estas cifras en perspectiva: la tuberculosis sigue siendo una de las principales causas de muerte por enfermedades infecciosas en el mundo (WHO, 2025). Cada persona con tuberculosis pulmonar activa puede infectar de 10 a 15 personas al año si no recibe tratamiento. La bacteria responsable, *Mycobacterium tuberculosis*, ha convivido con la humanidad durante al menos 70.000 años, adaptándose, evolucionando y perfeccionando sus estrategias de supervivencia.

En 1921, los científicos Albert Calmette y Camille Guérin desarrollaron la vacuna BCG (Bacilo de Calmette-Guérin) después de 13 años de cultivar repetidamente una cepa de *Mycobacterium bovis* hasta atenuarla (Luca & Mihaescu, 2013). Esta vacuna se convirtió en una de las más aplicadas en la historia de la medicina: más de 4 mil millones de dosis administradas en todo el mundo. BCG salvó millones de vidas infantiles al proteger contra las formas más graves de tuberculosis, como la meningitis tuberculosa. Pero había un problema: la vacuna no funcionaba bien en adultos, y la protección que confería se desvanecía con el tiempo.

La paradoja de BCG: cien años sin reemplazo

Cien años después, seguimos usando BCG. ¿Por qué? ¿Por qué no hemos podido desarrollar una mejor vacuna en todo un siglo de avances científicos y tecnológicos? La respuesta no es simple. Desarrollar una vacuna contra la tuberculosis es uno de los desafíos más complejos de la medicina moderna. Requiere entender cómo una bacteria intracelular puede "escondarse" dentro de nuestras propias células, cómo puede permanecer latente durante décadas sin causar síntomas, y cómo nuestro sistema inmune intenta, y a menudo falla, en eliminarla completamente.

Sin embargo, algo está cambiando, actualmente se encuentran en evaluación clínica 18 vacunas candidatas, seis de ellas en las etapas finales de prueba antes de su posible aprobación. Tecnologías que parecían futuristas hace una década, como

las vacunas de ARN mensajero que demostraron su potencial contra el COVID-19, ahora se están evaluando para ser usadas contra la tuberculosis. Equipos de científicos en todos los continentes trabajan con estrategias completamente diferentes: vacunas que refuerzan BCG, vacunas que usan virus modificados para entrenar al sistema inmune y vacunas que atacan las formas latentes de la bacteria. Este artículo explora ese siglo de espera y esa década emergente de esperanza. ¿Qué hizo tan difícil el desarrollo de nuevas vacunas? ¿Qué está cambiando ahora? Y lo más importante: ¿Cuáles vacunas podrían finalmente transformar la lucha contra esta milenaria enfermedad?

¿Por qué ha sido tan difícil desarrollar nuevas vacunas?

El fracaso más sonado en la historia reciente de vacunas contra tuberculosis ocurrió en 2013. La vacuna MVA85A había mostrado resultados prometedores en ratones, cobayas y primates no humanos. Los investigadores estaban optimistas, parecía que finalmente tendrían un refuerzo efectivo para BCG. Se realizó un ensayo clínico masivo en Sudáfrica con 2.797 bebés. El resultado fue devastador, pues la vacuna no demostró eficacia. La vacuna no funcionó en absoluto (Tameris et al., 2013). Este fracaso no solo representó años de trabajo perdido y millones de dólares invertidos, sino que reveló una verdad incómoda: no entendemos completamente qué hace que una vacuna contra la tuberculosis funcione en humanos.

La complejidad inmunológica de *Mycobacterium tuberculosis*

Mycobacterium tuberculosis es un adversario formidable. A diferencia de muchos patógenos que nuestro sistema inmune puede combatir con anticuerpos, esta bacteria vive y se reproduce dentro de nuestras propias células inmunes, específicamente en los macrófagos, las células diseñadas para destruir invasores. Es como si un ladrón se escondiera dentro de la estación de policía. Cuando un macrófago intenta digerir (fagocitar) la bacteria, *M. tuberculosis* bloquea este proceso y convierte al macrófago en su hogar (figura 1) (Cambier et al., 2014).

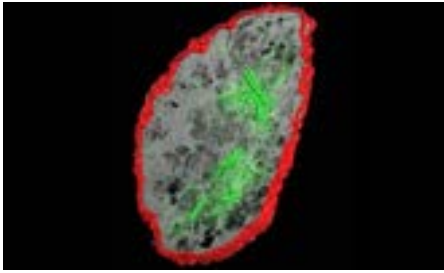


Figura 1. *M. tuberculosis* puede eludir el sistema inmune y sobrevivir dentro de los macrófagos. (<https://www.crick.ac.uk/news/2017-02-27-tb-bacteria-can-elude-our-immune-response-by-living-inside-dead-macrophages>)

La respuesta inmune contra la tuberculosis requiere un tipo específico de inmunidad, llamada inmunidad celular mediada por células T. No basta con tener anticuerpos; se necesita que células especializadas del sistema inmune (linfocitos T CD4+ y CD8+) reconozcan y destruyan las células infectadas. El problema es que no sabemos exactamente qué respuesta inmune genera protección duradera. Los científicos llaman a esto la ausencia de "correlatos de protección" (Maertzdorf et al., 2023). Es como intentar hornear un pastel perfecto sin saber qué ingredientes o temperaturas usar.

Para complicar más las cosas, *M. tuberculosis* tiene múltiples etapas de vida. Durante la infección activa, la bacteria expresa ciertos antígenos (proteínas que el sistema inmune puede reconocer). Pero cuando entra en estado latente, donde puede permanecer dormida durante décadas sin causar síntomas, expresa antígenos completamente diferentes. Una vacuna efectiva probablemente necesita generar inmunidad contra múltiples etapas del ciclo de vida bacteriano, algo que BCG no logra (Lin & Flynn, 2010).

El problema de los modelos animales

Los ratones han sido la base de la investigación biomédica durante décadas. Son económicos, se reproducen rápidamente y su genética está bien caracterizada. Pero los ratones no desarrollan tuberculosis como los humanos. Cuando se infectan con *M. tuberculosis*, no forman granulomas caseosos (las estructuras organizadas que el cuerpo humano crea para contener la infección) (figura 2), no desarrollan cavidades pulmonares y no transmiten la enfermedad por el aire como nosotros (Cadena et al., 2016). Esencialmente, estamos probando vacunas en un modelo que no replica bien la enfermedad humana.

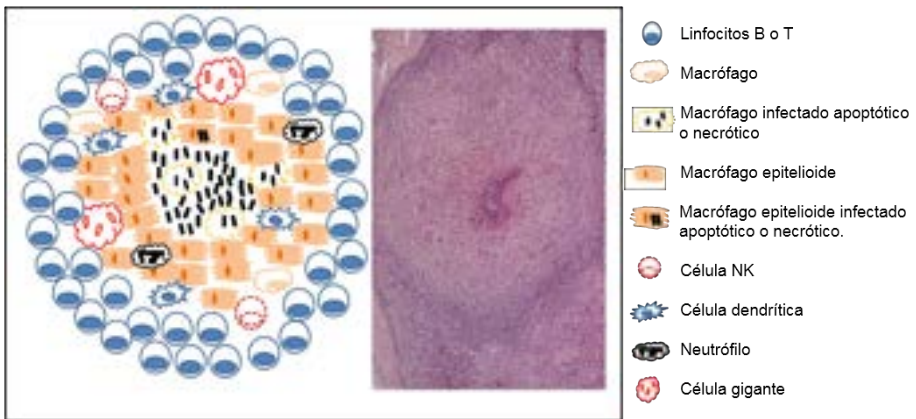


Figura 2. Granuloma. La respuesta inmune del hospedero culmina con el desarrollo de los granulomas. La infiltración de células en los pulmones durante la respuesta inicial se convierte en un granuloma primario con macrófagos localizados en el centro. (<https://www.immunology.org/es/public-information/immunologia-bitesized/pathogens-disease/tuberculosis>).

El caso de MVA85A es ilustrativo. Funcionó perfectamente en ratones, funcionó en cobayas, funcionó en macacos. Pero falló en humanos. ¿Por qué? Porque los sistemas inmunes de estas especies son diferentes al nuestro. Los ratones tienen un repertorio limitado de moléculas del Complejo Mayor de Histocompatibilidad (MHC, por sus siglas en inglés), las proteínas que presentan antígenos al sistema inmune. Los humanos tenemos una diversidad genética mucho mayor en estas moléculas, lo que significa que una vacuna puede funcionar en algunas personas pero no en otras (Gonzalo-Asensio et al., 2021). Además, en estudios con ratones, la bacteria típicamente se mantiene en fase de crecimiento activo. No alcanza a entrar en latencia verdadera; estamos literalmente estudiando solo una parte de la historia (Gupta & Katoch, 2005).

El desafío de los ensayos clínicos

Probar una vacuna contra tuberculosis en humanos es extraordinariamente complejo y costoso (figura 3). Consideremos los números: para demostrar que una vacuna funciona, se necesita

reclutar entre 10,000 y 20,000 participantes en regiones de alta incidencia de tuberculosis, seguirlos durante 2 a 5 años y esperar a que suficientes personas desarrollen la enfermedad para poder hacer comparaciones estadísticas válidas entre el grupo vacunado y el grupo placebo (Evans et al., 2016). El ensayo de fase 3 de M72/AS01E, por ejemplo, está reclutando 20.000 participantes en siete países (Sudáfrica, Zambia, Malawi, Mozambique, Kenia, Indonesia y Vietnam), con un seguimiento de 5 años. El costo estimado: entre 500 millones y 1 mil millones de dólares. Este tipo de estudios solo pueden realizarse en países de bajos y medianos ingresos donde la tuberculosis es endémica, lo que añade complejidades logísticas, éticas y regulatorias (Tait et al., 2023). Además, estos estudios deben considerar poblaciones especiales: personas viviendo con VIH (que tienen hasta 20 veces más riesgo de desarrollar tuberculosis), personas con diabetes, trabajadores de salud con alta exposición y contactos de pacientes con tuberculosis. Cada subgrupo puede responder diferente a la vacuna, requiriendo análisis estadísticos complejos y tamaños de muestra aún mayores.



Figura 3. Fases de desarrollo vacunal. <https://chlaep.org.uy/programa-nacional-operativo-de-inmunizaciones-2/vacunas-de-calidad/>

La paradoja del mercado

Aquí está el problema económico: las vacunas contra la tuberculosis son necesarias precisamente en los países más pobres del mundo. Treinta países concentran el 87% de los casos globales de tuberculosis, y la mayoría son naciones de bajos ingresos (WHO, 2025) que no pueden pagar los precios que la industria farmacéutica necesita para recuperar la inversión de mil millones de dólares. A diferencia de vacunas contra enfermedades que también afectan a países ricos (como COVID-19 o influenza), las vacunas contra tuberculosis enfrentan lo que los economistas llaman "falla de mercado". El impacto en salud pública es enorme, pero el retorno financiero es incierto. Esto ha requerido modelos de financiamiento innovadores: asociaciones público-privadas, fundaciones filantrópicas como la Fundación Bill y Melinda Gates, y organizaciones como Gates Medical Research Institute (Gates MRI) que asumen el riesgo financiero del desarrollo (Mangtani et al., 2014). En este contexto, desarrollar vacunas nuevas es tanto un desafío científico como político y económico.

Una nueva generación de vacunas

Por primera vez en mucho tiempo, hay razones para el optimismo. Como se mencionó anteriormente, el reporte mundial de tuberculosis 2025 de la OMS documenta 18 vacunas candidatas. Estas vacunas no son simplemente variaciones de BCG; representan estrategias completamente diferentes basadas en décadas de investigación sobre cómo funciona realmente *Mycobacterium tuberculosis*. Seis de estas vacunas están en la fase final de pruebas, a solo unos años de su potencial aprobación (figura 3). Otras ocho están en fases intermedias de evaluación, y cuatro más están iniciando pruebas en humanos (WHO, 2025). Estas vacunas tienen objetivos diversos: unas buscan prevenir la infección inicial en personas nunca expuestas a la tuberculosis, otras están diseñadas para evitar que la infección latente (cuando la bacteria está dormida en el cuerpo) se reactive y cause enfermedad. Un tercer grupo busca

prevenir recaídas en personas que ya fueron tratadas exitosamente. E incluso hay vacunas terapéuticas, diseñadas para administrarse junto con antibióticos y mejorar los resultados del tratamiento. Esta diversidad de enfoques refleja la complejidad del desafío y aumenta las probabilidades de que al menos algunas de estas estrategias funcionen.

M72/AS01E: la candidata más avanzada

Si tuviéramos que apostar por una vacuna, muchos científicos pondrían su dinero en M72/AS01E. Esta vacuna, desarrollada por GlaxoSmithKline (GSK) en colaboración con Gates Medical Research Institute, ya demostró que funciona. En un estudio de fase 2b realizado en Kenia, Sudáfrica y Zambia con más de 3,500 adultos con infección latente por tuberculosis, M72/AS01E previno la enfermedad en 49.7 % de las personas vacunadas, comparado con placebo. La eficacia se mantuvo durante tres años después de la vacunación (Van Der Meeren et al., 2018; Tait et al., 2019).

¿Qué hace especial a M72/AS01E? Es una vacuna de subunidades, lo que significa que no usa bacteria viva ni atenuada, sino solo dos proteínas específicas de *M. tuberculosis* (llamadas Mtb32A y Mtb39A, fusionadas en una sola molécula M72) combinadas con un adyuvante potente llamado AS01E (figura 4). Este adyuvante es crucial: activa el sistema inmune de forma específica para generar respuestas de células T, exactamente el tipo de inmunidad que se necesita contra la tuberculosis (Penn-Nicholson et al., 2018).

En marzo de 2024 inició el estudio de fase 3, el más grande jamás realizado para una vacuna contra tuberculosis: 20.000 participantes en siete países (Sudáfrica, Zambia, Malawi, Mozambique, Kenia, Indonesia y Vietnam), distribuidos en aproximadamente 60 sitios clínicos. El estudio incluyó a personas viviendo con VIH, un grupo tradicionalmente excluido de ensayos de vacunas pero que tiene un riesgo elevado de desarrollar tuberculosis. Los resultados se esperan para 2029, con posible licenciamiento en 2030 (Sable et al., 2021).

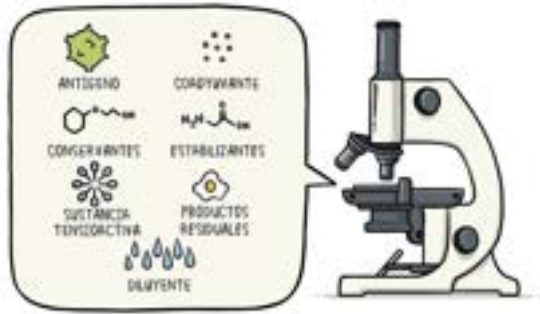


Figura 4. Componentes de una vacuna. <https://www.who.int/es/news-room/feature-stories/detail/how-are-vaccines-developed>

MTBVAC: apostando por el agente causal

MTBVAC (vacuna viva atenuada de *M. tuberculosis*) representa una estrategia radicalmente diferente. Es la única vacuna candidata derivada directamente de *Mycobacterium tuberculosis*, a diferencia de BCG que proviene de *Mycobacterium bovis* (la bacteria que causa tuberculosis en vacas). Científicos españoles de la Universidad de Zaragoza, en colaboración con Biofabri, tomaron una cepa de *M. tuberculosis* y la modificaron genéticamente para hacerla segura: eliminaron dos genes específicos (*phoP* y *fadD26*) que son esenciales para que la bacteria cause enfermedad, pero conservaron todo lo demás (Arbués et al., 2013). ¿Por qué esto importa? MTBVAC contiene 1,603 epítopos (las pequeñas partes de proteínas que el sistema inmune reconoce), comparados con solo 1,084 epítopos en BCG. Más epítopos significan más "blancos" para que el sistema inmune aprenda a reconocer, lo que teóricamente debería generar una protección más amplia y duradera (Gonzalo-Asensio et al., 2017). MTBVAC está siendo probada en recién nacidos de países de África subsahariana y podría reemplazar directamente a la BCG; un estudio de fase 3 está evaluando a 7,120 bebés. Simultáneamente, el ensayo IMAGINE (que inició en febrero de 2025) está probando MTBVAC en 4,300 adolescentes y adultos con infección latente, buscando prevenir que desarrollen enfermedad activa. Si ambos estudios tienen éxito, MTBVAC podría ser la primera vacuna que funciona tanto en niños como en adultos (Spertini et al., 2015; Tameris et al., 2019).

VPM1002: mejorando la BCG

VPM1002 toma la BCG y le hace una modificación ingeniosa. Científicos del Instituto Max Planck en Alemania reemplazaron un gen de BCG (llamado *ureC*) con un gen de otra bacteria (*Listeria monocytogenes*) que produce una proteína llamada listeriolisina O con una función fascinante: perfora la membrana del compartimento celular donde la bacteria está atrapada, permitiendo que escape al citoplasma de la célula (Grode et al., 2005). ¿Por qué es esto importante? Cuando *M. tuberculosis* está atrapada en compartimentos celulares, se activan linfocitos T CD4+, pero cuando la bacteria o sus proteínas llegan al citoplasma, también se activan linfocitos T CD8+, que son muy eficientes matando células infectadas. VPM1002 esencialmente "hackea" el sistema para generar una respuesta inmune más completa y potente (Farinacci et al., 2012).

Un estudio de fase 3 en recién nacidos de África subsahariana (con 6,940 participantes) está comparando VPM1002 contra BCG estándar, en espera de resultados para 2025. Paralelamente, en India se está probando VPM1002 en un estudio llamado PreVenTB que compara esta vacuna contra otra candidata (Immuvac/MIP) en 12,000 contactos domésticos de pacientes con tuberculosis. India es especialmente importante porque concentra una cuarta parte de todos los casos globales de tuberculosis (Loxton, 2021; Nemes et al., 2018).

La frontera del ARN mensajero

Las vacunas de ARN mensajero (mRNA) cambiaron el mundo durante la pandemia de COVID-19, demostrando que esta tecnología puede desarrollarse rápidamente, producirse a gran escala y ser altamente efectiva (figura 5). Ahora, BioNTech (la misma compañía detrás de la vacuna de mRNA contra el COVID-19 con Pfizer) está aplicando esta tecnología a la tuberculosis con financiamiento de la Fundación Gates. BioNTech está desarrollando dos vacunas candidatas: BNT164a1 y BNT164b1. Ambas codifican para ocho antígenos diferentes de *M. tuberculosis*, cuidadosamente seleccionados para cubrir diferentes fases del ciclo de vida bacteriano: antígenos expresados durante la infección activa (como Ag85A y ESAT-6), durante la latencia (como HspX) y durante la reactivación de bacterias

dormidas (como RpfA y RpfD). La diferencia entre las dos vacunas está en la formulación del mRNA: BNT164a1 usa mRNA no modificado, mientras que BNT164b1 usa mRNA modificado con N1-metil-pseudouridina, que genera respuestas inmunes más duraderas y reduce inflamación (Kagina et al., 2010; Knudsen et al., 2016).

Los estudios de fase 1 iniciaron en 2022 y se espera que concluyan en septiembre de 2025. Si los resultados son positivos, estas vacunas podrían avanzar rápidamente a fases posteriores aprovechando toda la infraestructura y conocimiento generado durante COVID-19. La ventaja de la tecnología mRNA es su flexibilidad: si se descubre que ciertos antígenos no funcionan bien, pueden reemplazarse rápidamente sin cambiar todo el proceso de manufactura.

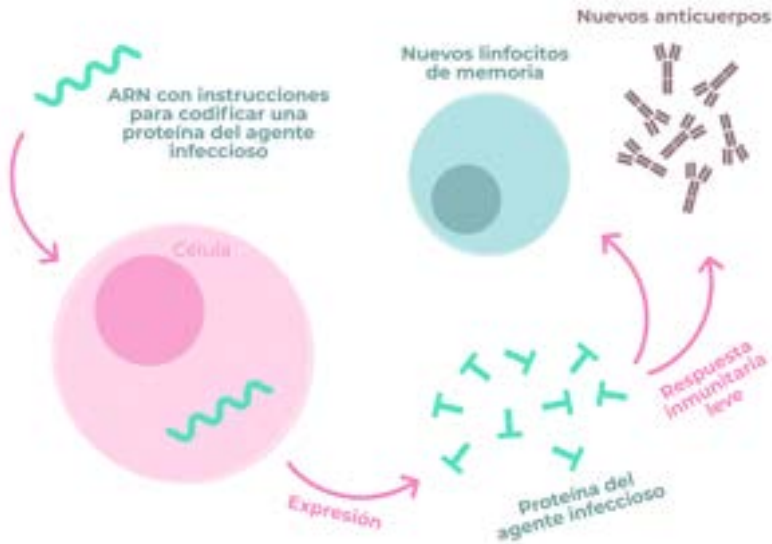


Figura 5. Funcionamiento de las vacunas de ARN mensajero.

(<https://genotipia.com/pfizer-vacuna-covid/>)

Perspectivas y desafíos

Tener 18 vacunas candidatas en evaluación clínica es un logro sin precedentes, pero el camino hacia la implementación global está lleno de obstáculos que van más allá de demostrar eficacia en ensayos clínicos. Muchas de las vacunas más prometedoras incluyen antígenos como ESAT-6 y CFP-10, dos proteínas que *Mycobacterium tuberculosis* produce abundantemente. El problema es que estas mismas proteínas son la base de las pruebas IGRA (Interferon-Gamma Release Assays), las pruebas de sangre más modernas para detectar infección por tuberculosis. Si una per-

sona recibe una vacuna que contiene ESAT-6 o CFP-10, su prueba IGRA dará positiva incluso si nunca se ha infectado con la bacteria real (Ruhwald et al., 2017). Esto crea un dilema: ¿cómo distinguiremos entre personas vacunadas y personas realmente infectadas? La solución requerirá desarrollar nuevas pruebas diagnósticas que puedan diferenciar entre respuesta vacunal e infección natural, o rediseñar vacunas para excluir estos antígenos específicos. Ambas opciones tienen costos y complejidades significativas (Schrager et al., 2020).

¿Qué impacto podemos esperar?

Estudios de modelamiento matemático ofrecen una visión esperanzadora. Si se implementara globalmente una vacuna con 50% de eficacia para prevenir tuberculosis pulmonar en adolescentes y adultos, se podrían prevenir aproximadamente 37 millones de casos y 4,6 millones de muertes entre 2025 y 2050 (Harris et al., 2019). Estos números asumen cobertura del 80% en países de alta carga y que la vacuna se despliegue comenzando en 2028-2030. Incluso una vacuna que prevenga recaídas en personas ya tratadas tendría un impacto sustancial. Aproximadamente 10% de las personas tratadas por tuberculosis desarrollan la enfermedad nuevamente. Una vacuna que reduzca

este riesgo a la mitad podría prevenir millones de casos secundarios y reducir la transmisión comunitaria significativamente (Abu-Raddad et al., 2009).

Lo más probable es que no haya una única "vacuna mágica". El futuro del control de tuberculosis probablemente involucre múltiples vacunas para diferentes poblaciones: una para recién nacidos, otra para adolescentes y adultos y quizás vacunas terapéuticas para mejorar los resultados del tratamiento. Esta estrategia de múltiples herramientas, similar a cómo se combaten otras enfermedades complejas, podría finalmente romper las cadenas de transmisión de tuberculosis.

Conclusión

Después de un siglo de espera, el mensaje del reporte de la OMS de 2025 es claro pero matizado: estamos más cerca que nunca de nuevas herramientas para combatir la tuberculosis, pero el camino hacia la implementación a gran escala está lleno de desafíos científicos, logísticos, económicos y políticos. La evaluación de estas vacunas no anuncia victoria, pero sí marca un cambio de era: de un siglo de estancamiento a una década de posibilidades sin precedentes. La pregunta ya no es si tendremos nuevas vacunas contra tuberculosis, sino cuántas, cuándo y cómo aseguraremos que lleguen a quienes más las necesitan.

Conflicto de intereses

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles para la realización del mismo, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Descargo de Responsabilidad (Inteligencia Artificial)

Los autores declaran por la presente que NO se han utilizado tecnologías de IA generativa, tales como modelos de lenguaje grandes (ChatGPT, COPILOT, etc.) y generadores de texto a imagen, durante la redacción o edición de este manuscrito.

Agradecimientos

Las autoras agradecen a la SECIHTI por el apoyo otorgado para la realización de la Estancia Posdoctoral por México dentro del proyecto titulado “Polimorfismos en genes asociados con la permeabilidad celular en cepas de *Mycobacterium tuberculosis* con discrepancias entre la susceptibilidad fenotípica y genotípica a los antibióticos” llevada a cabo en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Referencias

- Abu-Raddad, L. J., Sabatelli, L., Achterberg, J. T., Sugimoto, J. D., Longini, I. M., Dye, C., & Halloran, M. E. (2009). Epidemiological benefits of more-effective tuberculosis vaccines, drugs, and diagnostics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(33), 13980-13985. <https://doi.org/10.1073/pnas.0901720106>
- Arbués, A., Aguilo, J. I., Gonzalo-Asensio, J., Marinova, D., Uranga, S., Puentes, E., Fernandez, C., Parra, A., Cardona, P. J., Vilaplana, C., Ausina, V., Williams, A., Clark, S., Malaga, W., Guilhot, C., Gicquel, B., & Martin, C. (2013). Construction, characterization and preclinical evaluation of MTBVAC, the first live-attenuated *M. tuberculosis*-based vaccine to enter clinical trials. *Vaccine*, 31(42), 4867-4873. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2013.07.051>
- Cadena, A. M., Fortune, S. M., & Flynn, J. L. (2017). Heterogeneity in tuberculosis. *Nature Reviews Immunology*, 17(11), 691-702. <https://doi.org/10.1038/nri.2017.69>
- Cambier, C. J., Falkow, S., & Ramakrishnan, L. (2014). Host evasion and exploitation schemes of *Mycobacterium tuberculosis*. *Cell*, 159(7), 1497-1509. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2014.11.024>
- Evans, T. G., Schrager, L., & Thole, J. (2016). Status of vaccine research and development of vaccines for tuberculosis. *Vaccine*, 34(26), 2911-2914. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2016.02.079>
- Farinacci, M., Weber, S., & Kaufmann, S. H. (2012). The recombinant tuberculosis vaccine rBCG ureC::hly+ induces apoptotic vesicles for improved priming of CD4+ and CD8+ T cells. *Vaccine*, 30(52), 7608-7614. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2012.10.031>
- Gonzalo-Asensio, J., Marinova, D., Martin, C., & Aguilo, N. (2017). MTBVAC: Attenuating the human pathogen of tuberculosis (TB) toward a promising vaccine against the TB epidemic. *Frontiers in Immunology*, 8, 1803. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2017.01803>
- Gonzalo-Asensio, J., Soto, C. Y., Arbués, A., Sancho, J., del Carmen Menéndez, M., García, M. J., Gicquel, B., & Martin, C. (2008). The *Mycobacterium tuberculosis* phoPR operon is positively autoregulated in the virulent strain H37Rv. *Journal of bacteriology*, 190(21), 7068-7078. <https://doi.org/10.1128/JB.00712-08>
- Grode, L., Seiler, P., Baumann, S., Hess, J., Brinkmann, V., Nasser Eddine, A., Mann, P., Goosmann, C., Bandermann, S., Smith, D., Bancroft, G. J., Reyat, J. M., van Soolingen, D., Raupach, B., & Kaufmann, S. H. (2005). Increased vaccine efficacy against tuberculosis of recombinant *Mycobacterium bovis* bacille Calmette-Guérin mutants that secrete listeriolysin. *Journal of Clinical Investigation*, 115(9), 2472-2479. <https://doi.org/10.1172/JCI24617>
- Gupta, U. D., & Katoch, V. M. (2005). Animal models of tuberculosis. *Tuberculosis*, 85(5-6), 277-293. <https://doi.org/10.1016/j.tube.2005.08.008>
- Harris, R. C., Sumner, T., Knight, G. M., & White, R. G. (2016). Systematic review of mathematical models exploring the epidemiological impact of future TB vaccines. *Human Vaccines & Immunotherapeutics*, 12(11), 2813-2832. <https://doi.org/10.1080/21645515.2016.1205769>
- Kagina, B. M., Abel, B., Scriba, T. J., Hughes, E. J., Keyser, A., Soares, A., Gamielidien, H., Sidibana, M., Hatherill, M., Gelderbloem, S., Mahomed, H., Hawkrige, A., Hussey, G., Kaplan, G., & Hanekom, W. A. (2010). Specific T cell frequency and cytokine expression profile do not correlate with protection against tuberculosis after bacillus Calmette-Guérin vaccination of newborns. *American Journal of Respiratory and Critical*

- Care Medicine, 182(8), 1073-1079. <https://doi.org/10.1164/rccm.201003-0334OC>
- Knights, G. M., Griffiths, U. K., Sumner, T., Laurence, Y. V., Gheorghe, A., Vassall, A., Glaziou, P., & White, R. G. (2020). Impact and cost-effectiveness of new tuberculosis vaccines in low- and middle-income countries. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(43), 15520-15525. <https://doi.org/10.1073/pnas.1404386111>
- Knudsen, N. P., Olsen, A., Buonsanti, C., Follmann, F., Zhang, Y., Coler, R. N., Fox, C. B., Meinke, A., D'Oro, U., Casini, D., Bonci, A., Billeskov, R., de Gregorio, E., Rappuoli, R., Harandi, A. M., Andersen, P., & Agger, E. M. (2016). Different human vaccine adjuvants promote distinct antigen-independent immunological signatures tailored to different pathogens. *Scientific Reports*, 6, 19570. <https://doi.org/10.1038/srep19570>
- Lin, P. L., & Flynn, J. L. (2010). Understanding latent tuberculosis: a moving target. *Journal of Immunology*, 185(1), 15-22. <https://doi.org/10.4049/jimmunol.0903856>
- Loxton, A. G. (2021). Immunological and molecular characterisation of tuberculosis infection and disease. *Frontiers in Immunology*, 12, 718601. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2021.718601>
- Luca, S., & Mihaescu, T. (2013). History of BCG vaccine. *Maedica*, 8(1), 53-58.
- Maertzdorf, J., Kaufmann, S. H. E., & Weiner, J. (2023). Toward a unified research agenda for tuberculosis: A systematic review of tuberculosis research priorities. *PLoS Medicine*, 20(10), e1004255. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1004255>
- Mangtani, P., Abubakar, I., Ariti, C., Beynon, R., Pimpin, L., Fine, P. E., Rodrigues, L. C., Smith, P. G., Lipman, M., Whiting, P. F., & Sterne, J. A. (2014). Protection by BCG vaccine against tuberculosis: A systematic review of randomized controlled trials. *Clinical Infectious Diseases*, 58(4), 470-480. <https://doi.org/10.1093/cid/cit790>
- Nemes, E., Geldenhuys, H., Rozot, V., Rutkowski, K. T., Ratangee, F., Bilek, N., Mabwe, S., Makhetha, L., Erasmus, M., Toefy, A., Mulenga, H., Hanekom, W. A., Self, S. G., Bekker, L. G., Ryall, R., Gurunathan, S., DiazGranados, C. A., Andersen, P., Kromann, I., ... & Hatherill, M. (2018). Prevention of M. tuberculosis infection with H4:IC31 vaccine or BCG revaccination. *New England Journal of Medicine*, 379(2), 138-149. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1714021>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2025). Global tuberculosis report 2025. <https://www.who.int/teams/global-tuberculosis-programme/tb-reports>
- Penn-Nicholson, A., Geldenhuys, H., Burny, W., van der Most, R., Day, C. L., Jongert, E., Moris, P., Hatherill, M., Ofori-Anyinam, O., Hanekom, W., Bollaerts, A., Demoitie, M. A., Tameris, M., de Bruyn, G., Duarte dos Santos, G., Van Der Meeren, O., & Scriba, T. J. (2018). Safety and immunogenicity of candidate vaccine M72/AS01E in South African adults with and without HIV infection: A phase I/IIa randomized non-inferiority trial. *Vaccine*, 36(37), 5568-5575. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2018.07.028>
- Ruhwald, M., et al. (2017). Introducing the ESAT-6 free IGRA, a companion diagnostic for TB vaccines based on ESAT-6. *Scientific Reports*, 7, 45969. <https://doi.org/10.1038/srep45969>
- Sable, S. B., Verma, I., & Behera, D. (2021). Tuberculosis vaccine development: Progress and challenges. *Human Vaccines & Immunotherapeutics*, 17(12), 5038-5050. <https://doi.org/10.1080/21645515.2021.1984132>
- Schrager, L. K., Harris, R. C., & Vekemans, J. (2018). Research and development of new tuberculosis vaccines: A review. *F1000Research*, 7, 1732. <https://doi.org/10.12688/f1000research.16521.2>

- Spertini, F., Audran, R., Chakour, R., Karoui, O., Steiner-Monard, V., Thierry, A. C., Mayor, C. E., Rettby, N., Jatón, K., Vallotton, L., Lazor-Blanchet, C., Doce, J., Puentes, E., Marinova, D., Aguilo, N., & Martin, C. (2015). Safety of human immunisation with a live-attenuated *Mycobacterium tuberculosis* vaccine: a randomised, double-blind, controlled phase I trial. *The Lancet Respiratory Medicine*, 3(12), 953-962. [https://doi.org/10.1016/S2213-2600\(15\)00435-X](https://doi.org/10.1016/S2213-2600(15)00435-X)
- Tait, D. R., Hatherill, M., van der Meeren, O., Ginsberg, A. M., Van Brakel, E., Salaun, B., Scriba, T. J., Akite, E. J., Ayles, H. M., Bollaerts, A., Demoitie, M. A., Diacon, A., Evans, T. G., Gillard, P., Hellström, E., Innes, J. C., Lempicki, M., Malahleha, M., Martinson, N., ... & M72-020 Study Group. (2019). Final analysis of a trial of M72/AS01E vaccine to prevent tuberculosis. *New England Journal of Medicine*, 381(25), 2429-2439. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1909953>
- Tameris, M. D., Hatherill, M., Landry, B. S., Scriba, T. J., Snowden, M. A., Lockhart, S., Shea, J. E., McClain, J. B., Hussey, G. D., Hanekom, W. A., Mahomed, H., McShane, H., & MVA85A 020 Trial Study Team. (2013). Safety and efficacy of MVA85A, a new tuberculosis vaccine, in infants previously vaccinated with BCG: A randomised, placebo-controlled phase 2b trial. *The Lancet*, 381(9871), 1021-1028. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(13\)60177-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(13)60177-4)
- Tameris, M., Mearns, H., Penn-Nicholson, A., Gregg, Y., Bilek, N., Mabwe, S., Geldenhuys, H., Shenje, J., Luabeya, A. K. K., Murillo, I., Nombida, O., Tait, D., Nkonyana, Y., Makhetha, L., Africa, H., Lempicki, M., Ginsberg, A. M., Mulenga, H., Hanekom, W. A., Reed, S. G., Coler, R. N., Sizemore, C., Scriba, T. J., Hatherill, M., & Mahomed, H. (2019). Live-attenuated *Mycobacterium tuberculosis* vaccine MTBVAC versus BCG in adults and neonates: a randomised controlled, double-blind dose-escalation trial. *The Lancet Respiratory Medicine*, 7(9), 757-770. [https://doi.org/10.1016/S2213-2600\(19\)30251-6](https://doi.org/10.1016/S2213-2600(19)30251-6)
- Trunz, B. B., Fine, P., & Dye, C. (2006). Effect of BCG vaccination on childhood tuberculous meningitis and miliary tuberculosis worldwide: a meta-analysis and assessment of cost-effectiveness. *The Lancet*, 367(9517), 1173-1180. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(06\)68507-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(06)68507-3)
- Van Der Meeren, O., Hatherill, M., Nduba, V., Wilkinson, R. J., Muyoyeta, M., Van Brakel, E., Ayles, H. M., Henostroza, G., Thienemann, F., Scriba, T. J., Diacon, A., Blatner, G. L., Demoitie, M. A., Tameris, M., Malahleha, M., Innes, J. C., Hellström, E., Martinson, N., Singh, T., Akite, E. J., Khatri Ghaswalla, P., Satti, I., Kolkman, J., Moris, P., Delvaux, S., Leboulleux, D., Sadoff, J., Hanekom, W. A., Gillard, P., & Ginsberg, A. M. (2018). Phase 2b controlled trial of M72/AS01E vaccine to prevent tuberculosis. *New England Journal of Medicine*, 379(17), 1621-1634. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1803484>

Recepción: 20.03.2026
Revisión: 31.03.2026

Publicación: 08.05.2026

<https://orcid.org/0000-0003-2396-7890>

<https://orcid.org/0009-0009-3597-6875>

<https://orcid.org/0000-0003-4468-8858>

<https://orcid.org/0009-0005-5760-5873>

<https://orcid.org/0009-0005-5816-6630>

<https://orcid.org/0000-0002-3012-1095>

<https://orcid.org/0000-0002-9501-2017>

<https://orcid.org/0000-0002-2023-2242>

SÍNDROME DE DESGASTE PROFESIONAL (SÍNDROME DE BURNOUT) EN EL PERSONAL ACADÉMICO, ADMINISTRATIVO Y DE LA SALUD. UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA

PROFESSIONAL BURNOUT SYNDROME IN ACADEMIC, ADMINISTRATIVE,
AND HEALTHCARE PROFESSIONALS: A SYSTEMATIC REVIEW

Bravo-Benítez J.^{1,2,4},

García-Medina V.²,

Rivera E³

Bonilla-Toscano L. R.⁴,

Espino M.⁴,

Bohórquez- López²,

Pastelín C.⁵

Morán C.^{6*}

¹Centro de Investigación en Físicoquímica de Materiales, Instituto de Ciencias,
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.

²Departamento de Educación en Investigación Clínica, RedOSMO, Oaxaca Site
Management Organization, Oaxaca de Juárez, México.

³Complejo Regional Centro- Acatzingo, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.

⁴Dirección de Ciencias de la Vida, Universidad del Valle de Puebla, Puebla, México.

⁵Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.

Correos:

juan.bravob@correo.buap.mx

vianey.gmv@hotmail.com

aria.riveraca@correo.buap.mx

dir.vida@uvp.mx

dir.general.pue@uvp.mx

victor@redosmo.com

cesar.pastelin@correo.buap.mx

carolina.moran@correo.buap.mx*

Resumen

Se analizó la evidencia existente sobre el síndrome de desgaste profesional (SDP) en profesionales de la salud, docentes, investigadores y personal administrativo, identificando factores asociados, manifestaciones y consecuencias a nivel individual, organizacional y socioemocional. Se realizó una revisión de la literatura académica centrada en estudios empíricos y documentos teóricos publicados en español e inglés. Se incluyeron investigaciones relacionadas con el SDP y el análisis se organizó en una síntesis narrativa de los principales hallazgos. La evidencia revisada muestra que el SDP es un fenómeno multifactorial que afecta significativamente a todos los profesionales estudiados. Los factores más frecuentes incluyen sobrecarga laboral, presiones por productividad, inestabilidad institucional, doble presencia laboral-familiar, clima organizacional deficiente y escasez de recursos. Se observó mayor vulnerabilidad en mujeres. El agotamiento se manifiesta como desgaste emocional, despersonalización y baja autoeficacia. El SDP constituye un problema emergente subestimado. La literatura evidencia la necesidad urgente de implementar estrategias de prevención organizacional, programas de acompañamiento emocional, mejoras estructurales en la gestión del trabajo y políticas que integren la equidad de género.

Palabras clave: *síndrome de desgaste profesional (burnout), estrés laboral, profesores-investigadores, salud ocupacional, clima organizacional, agotamiento emocional.*

Abstract

To analyze the existing evidence on burnout syndrome (BS) among healthcare professionals, teachers, researchers, and administrative staff, identifying associated factors, manifestations, and consequences at the individual, organizational, and socio-emotional levels. An academic literature review was conducted, focusing on empirical studies and theoretical documents published in Spanish and English. Research related to BSS was included, and the analysis was organized into a narrative synthesis of the main findings. The reviewed evidence shows that BSS is a multifactorial phenomenon that significantly affects all the professionals studied. The most common factors include work overload, productivity pressures, institutional instability, work-family duality, a poor organizational climate, and a shortage of resources. Greater vulnerability was observed among women. Burnout manifests as emotional exhaustion, depersonalization, and low self-efficacy. Burnout syndrome constitutes an underestimated emerging problem. The literature highlights the urgent need to implement organizational prevention strategies, emotional support programs, structural improvements in work management, and policies that integrate gender equity.

Keywords: *occupational burnout syndrome, work-related stress, faculty-researchers, occupational health, organizational climate, emotional exhaustion.*

Introducción

Conociendo el síndrome de desgaste profesional

El síndrome de desgaste profesional (SDP), también conocido como síndrome de burnout, se reconoce actualmente como un trastorno adaptativo crónico que surge de un afrontamiento inadecuado ante las exigencias psicológicas del trabajo. Este síndrome se manifiesta cuando las personas no logran responder de manera saludable a las demandas constantes de su entorno laboral, lo que deteriora su calidad de vida y afecta su salud mental y física. Se trata de un estado de agotamiento físico, emocional y cognitivo que surge tras una exposición prolongada al estrés laboral (Martínez Pérez, 2010; Polacov et al., 2021). Por esta razón, se le considera un problema de salud ocupacional que puede afectar tanto el desempeño individual como el funcionamiento organizacional.

El SDP ha recibido distintos nombres, como síndrome de desgaste profesional, síndrome de sobrecarga emocional, síndrome del quemado o síndrome de fatiga laboral (Bianchi et al., 2015). Este síndrome engloba un conjunto de síntomas que repercuten negativamente en el bienestar de quienes lo padecen, especialmente en los profesionales que trabajan bajo altos niveles de exigencia (Maslach & Leiter, 2016). Se describe como un proceso de “quemarse por el trabajo”, caracterizado por la percepción negativa de la propia capacidad para realizar las tareas asignadas, dificultades en la relación con las personas atendidas, sensación de agotamiento emocional y desarrollo de actitudes de cinismo y de distanciamiento emocional (del Pilar Pulido-Ramírez et al., 2025). Este distanciamiento emocional lleva a percibir a los demás de forma deshumanizada, como consecuencia de un endurecimiento afectivo que actúa como mecanismo de defensa. Cabe señalar que el SDP no debe confundirse con el estrés agudo, pues este último representa una respuesta prolongada y persistente a fuentes crónicas de tensión laboral, en particular aquellas que se originan en la relación profesional-cliente y en los vínculos con la organización.

El estudio del SDP se inició con las observaciones de Freudenberg (1975), quien describió el desgaste de los profesionales en contextos de alta demanda. A partir de ahí, se han propuesto tres etapas fundamentales en su desarrollo: el agotamiento emocional, que corresponde a la pérdida de energía y motivación; la despersonalización o deshumanización, que consiste en un trato frío y distante hacia los demás; y la baja realización personal, que implica una sensación de ineficacia y falta de logros (Lovo, 2020). Por su parte, el SDP se ha documentado en comunidades académicas, administrativas, del sector salud y judiciales, e incluso en contextos domésticos, lo que evidencia que cualquier rol con alta carga emocional y responsabilidad puede generar condiciones propicias para su aparición (González Correales et al., 2002). Desde la perspectiva de la psicología positiva, se ha buscado complementar este enfoque con estrategias orientadas a rescatar las fortalezas individuales frente al estrés y la depresión. La investigación sobre el agotamiento propone superar las visiones centradas exclusivamente en la patología, para que, en su lugar, se fomenten recursos que favorezcan la resiliencia y la salud mental (Caballero Domínguez et al., 2010). La magnitud del problema puede observarse en las estadísticas globales; un ejemplo de ello es lo reportado por Smith & Wesselbaum (2025), quienes señalan que los empleados a nivel mundial experimentan niveles históricos de estrés; entre los principales factores asociados se encuentran la inestabilidad de los ingresos, los problemas de salud y la inseguridad alimentaria. Además, las diferencias de género son más marcadas en los países de altos ingresos, donde las mujeres reportan un mayor estrés. Por otro lado, la encuesta *State of the Global Workplace* 2023 de Gallup, realizada en 160 países, arrojó información sobre conflictos frecuentes entre trabajadores y supervisores, lo que refleja un clima organizacional deteriorado y poco propicio para el bienestar. Esta situación, además

de afectar la salud emocional, genera un círculo vicioso: el estrés disminuye la productividad, lo que, a su vez, alimenta la frustración y acentúa las fases del síndrome (Serna Corredor & Martínez

Sánchez, 2020). En síntesis, el SDP es un fenómeno complejo y multidimensional que afecta significativamente tanto a individuos como a organizaciones (Tabla 1) (Figura 1).

Tabla 1. MODELOS DE SÍNDROME DE DESGASTE PROFESIONAL Modelos teóricos del síndrome de desgaste profesional, descritos en la literatura, que han contribuido a su investigación y comprensión en diversos sectores laborales donde este síndrome se presenta o puede desarrollarse (Salvagioni et al., 2017).

Modelos integrales	Representantes	Descripción
Modelos elaborados desde la teoría socio-cognitiva del yo	El modelo de Cherniss (1993) El modelo de autocontrol de Thompson, Page y Cooper (1993).	Está inspirado en los trabajos de Albert Bandura: analizar los mecanismos psicológicos que intervienen en la determinación de la acción, así como el papel del pensamiento autorreferente en el funcionamiento humano.
Los modelos elaborados a partir de las teorías del intercambio social.	Buunk y Schaufeli (1993) Hobfoll y Freddy (1993)	Consideran los principios teóricos de la equidad.
Modelos desarrollados desde la teoría organizacional	El modelo de Golembiewski, Munzenrider y Carter (1983) El modelo de Cox, Kuk y Leiter (1993) El modelo de Winnubst (1993)	Tienen en común el énfasis en los estresores del contexto organizacional y en las estrategias de afrontamiento ante la experiencia de quemarse por el trabajo. Todos consideran que el síndrome de quemarse en el trabajo es una respuesta al estrés laboral.
Modelos de proceso	Representantes	Descripción
Modelo tridimensional del MBI-HSS	Maslach (1982) Golembiewski, Munzenrider, and Carter (1983) Leiter y Maslach (1988) Lee and Ashforth (1993) Gil-Monte (1994)	Considera aspectos cognitivos (baja realización personal), emocionales (agotamiento emocional) y actitudinales (despersonalización)
Modelo de Edelwich y Brodsky	Edelwich and Brodsky (1980)	El síndrome de desgaste profesional es un proceso de desilusión o desencanto hacia la actividad laboral, que se desarrolla en cuatro fases: 1. Entusiasmo, 2. Estancamiento, 3. Frustración y 4. Apatía.
Modelo de Price y Murphy	Price y Murphy (1984)	El burnout es un proceso de adaptación a las situaciones de estrés laboral, se da en seis fases sintomáticas: 1. Desorientación, 2. Labilidad emocional, 3. Culpa debido al fracaso profesional, 4. Soledad y tristeza 5. Solicitud de ayuda y 6. Equilibrio.
Modelo de Gil Monte	Gil Monte (2005)	Distingue dos perfiles en el proceso del SQT (Síndrome de Quemarse por el Trabajo): Perfil I 1. Se caracteriza por la presencia de baja ilusión por el trabajo, junto a altos niveles de desgaste psíquico e indolencia, pero los individuos no presentan sentimientos de culpa. Perfil I 2. Constituye con frecuencia un problema más serio que identificaría a los casos clínicos más deteriorados por el desarrollo del SQT. Además, los individuos presentan también sentimientos de culpa.



Figura 1. Modelo tridimensional del síndrome de desgaste profesional. Representa las tres dimensiones centrales: agotamiento emocional, despersonalización y baja realización personal. Asimismo, muestra sus principales consecuencias en la salud mental y física, así como en el desempeño laboral, incluyendo disminución de la productividad, calidad del trabajo, ausentismo y rotación del personal (Elaborado en Power Point por Bravo-Benítez J., 2026).

La identificación temprana del síndrome permite implementar estrategias de prevención y de mejora de la calidad de vida laboral, sin limitar su relevancia a un sector en particular.

Para su estudio se utiliza el enfoque del Maslach Burnout Inventory (MBI), desarrollado en los años ochenta por Christina Maslach y Michael Leiter (Maslach & Leiter, 2016), un instrumento psicométrico que distingue claramente el burnout del estrés laboral y evalúa tres dimensiones: agotamiento emocional, despersonalización y baja realización personal (Olivares Faúndez, 2017). Se basa en la concepción del SDP como una experiencia individual y crónica de estrés, enmarcada

en un contexto social, lo que la convierte en la herramienta de referencia en la investigación y la práctica clínica (Olivares Faúndez, 2017).

Dado que existe evidencia de que el síndrome de desgaste profesional puede afectar la salud, se buscó identificar qué aspectos son los más relevantes relacionados con este síndrome. Este trabajo busca comprender la evolución conceptual del síndrome, un fenómeno complejo, así como ayudar a identificar factores asociados y discutir sus implicaciones en contextos académicos y organizacionales, sin pretender estimar cuantitativamente los efectos ni comparar estadísticamente los estudios.

Revisión de la literatura

El presente trabajo se desarrolló como una revisión narrativa de la literatura con enfoque descriptivo-analítico, cuyo propósito fue integrar y analizar la evidencia científica disponible sobre el SDP en profesionales vinculados a la salud, a la docencia e investigación universitaria, y al personal administrativo.

La búsqueda bibliográfica se realizó en bases de datos científicas y repositorios académicos de amplio reconocimiento, entre los que se inclu-

yeron Scopus, PubMed, SciELO, Redalyc, Dialnet y Google Scholar. Se consideraron publicaciones en español e inglés, utilizando combinaciones de palabras clave relacionadas con el fenómeno de estudio, que incluyen: síndrome de desgaste profesional, síndrome de *burnout*, investigadores, personal académico, estrés laboral, salud ocupacional y clima organizacional, así como operadores booleanos. Con el fin de garantizar la actualidad y la pertinencia de la evidencia, se priorizaron los estudios publicados entre 2010 y 2025.

El proceso de selección de los estudios se realizó en cuatro fases consecutivas: identificación, cribado, evaluación de elegibilidad e inclusión final. En una primera etapa, se identificaron los registros potencialmente relevantes a partir de la búsqueda en las bases de datos señaladas. Posteriormente, se eliminaron los documentos duplicados y se efectuó una revisión de títulos y resúmenes para descartar aquellos que no guardaban relación directa con el síndrome de burnout en contextos laborales o académicos. En la fase de elegibilidad, los textos completos fueron seleccionados conforme a criterios previamente definidos que abordaron el burnout en el personal de salud, investigadores, personal académico y personal administrativo vinculado a la actividad científica, así como en profesiones con altas demandas cognitivas y emocionales. Se incluyeron artículos originales, revisiones teóricas y narrativas. Se excluyeron documentos sin arbitraje académico, publicaciones de divulgación general, estudios carentes de sustento metodológico y aquellos que no aportaron información relevante para los objetivos del presente trabajo.

Los estudios incluidos fueron analizados de manera cualitativa mediante una síntesis narrativa, identificando patrones y categorías temáticas recurrentes, relacionados con los factores individuales y organizacionales asociados al síndrome de burnout, sus principales manifestaciones emocionales y psicosociales, las diferencias observadas por género, las consecuencias en la salud mental y el desempeño laboral, así como las estrategias de prevención e intervención propuestas en el ámbito institucional. La información se organizó de forma comparativa, lo que permitió contrastar hallazgos entre distintos contextos laborales y extraer implicaciones específicas para el entorno de la investigación científica. Finalmente, al tratarse de una revisión documental, no fue necesaria la aprobación de un comité de ética ni la obtención de consentimiento informado, dado que no se trabajó con participantes humanos ni se manejaron datos sensibles. No obstante, el estudio se realizó respetando los principios éticos de la investigación científica, asegurando la adecuada citación de

las fuentes consultadas y el reconocimiento de la autoría intelectual, conforme a las normas internacionales de publicación académica.

Importancia del estudio del SDP

La comprensión de los antecedentes del SDP requiere explorar sus raíces históricas y las investigaciones que han permitido su reconocimiento en los ámbitos académico y profesional; por su parte, analizar la evolución del concepto y su adaptación a distintos contextos culturales resulta relevante para contextualizar los estudios actuales. En sus inicios, el término apareció en 1961 en la obra literaria *A Burnout Case* de Graham Greene, donde se relataba la historia de un arquitecto que, agotado espiritual y emocionalmente, abandonaba su profesión (Salvagioni et al., 2017). Aunque aún no era un término científico, sí representaba una metáfora del desgaste asociado al trabajo.

En 1974, Herbert Freudenberger introdujo el concepto en el campo de la psicología, describiéndolo como “desgaste profesional” o “síndrome de quemarse por el trabajo”, y observó en profesionales de los servicios humanos una pérdida gradual de energía, motivación y compromiso, lo que se traducía en agotamiento y despersonalización (Mathkour et al., 2025). Por su parte, Christina Maslach consolidó el término al presentarlo en el Congreso Anual de la Asociación Americana de Psicología y, a su vez, junto con Susan Jackson, en 1981 definió el SDP como un síndrome de estrés laboral crónico caracterizado por tres dimensiones: agotamiento emocional, despersonalización y baja realización personal, especialmente en profesiones centradas en la atención a otras personas (Olivares Faúndez, 2017). A medida que el concepto ganó reconocimiento, la OMS lo declaró en el año 2000 como un factor de riesgo laboral debido a sus efectos negativos sobre la calidad de vida y la salud mental (Mathkour et al., 2025).

En México, la relevancia del síndrome se reflejó en la publicación de la Norma Oficial Mexicana NOM-035-STPS-2018, que obliga a las organi-

zaciones a identificar, analizar y prevenir riesgos psicosociales, entre ellos el SDP, con el fin de promover un entorno de trabajo saludable (Contreras et al., 2023; Gaviño Contreras et al., 2023). Ahora bien, la permanencia prolongada en entornos laborales estresantes, sin un adecuado abordaje del SDP, puede impactar negativamente no solo al trabajador, sino también a su entorno familiar, por lo cual, en el ámbito organizacional, los efectos se traducen en disminución de la productividad, deterioro de la calidad en la atención a clientes o estudiantes y, en consecuencia, pérdidas económicas y de reputación. En este sentido, atender el SDP no debe considerarse un gasto, sino una inversión en el bienestar y la sostenibilidad laboral (Mathkour et al., 2025).

Revisión de estudios relacionados con el SDP

El análisis de investigaciones previas ha permitido comprender las tendencias del SDP y detectar vacíos de conocimiento. Un estudio reciente, realizado en 2023, con fisioterapeutas de hospitales de Castilla y León (España), evaluó una muestra de 72 profesionales, en su mayoría mujeres, con una edad media de

42.8 años. Los resultados mostraron niveles medios-altos de agotamiento emocional y despersonalización, bajos en la realización personal y baja satisfacción laboral; sin embargo, se evidenció una elevada motivación intrínseca, lo que resalta la complejidad del fenómeno. El estudio utilizó el MBI y el cuestionario CVP-35, lo que confirma la necesidad de apoyo institucional para mitigar los efectos del síndrome (Domingo Esteban et al., 2024).

Otro trabajo desarrollado en México, con cuerpos policiales, analizó la relación entre variables del ciclo circadiano (alimentación, horarios de comida y sueño) y la presencia del síndrome. Los resultados indicaron que las dietas deficientes y los horarios irregulares se asocian con niveles más altos de agotamiento emocional y de despersonalización. Además, se observó que las personas casadas reportaban menos despersonalización que las solteras o divorciadas, lo que sugiere que la estabilidad familiar puede actuar como factor protector (Torres-Vences et al., 2022). Estos hallazgos refuerzan la importancia de incluir factores de salud integral en el análisis del síndrome.

Estudios empíricos como sustento en la comprensión del síndrome de desgaste profesional

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha señalado que la calidad de vida debe evaluarse de manera integral, incorporando dimensiones físicas, psicológicas, sociales y ambientales, lo que implica no solo atender al paciente, sino también al cuidador o al trabajador que se enfrenta diariamente a la sobrecarga emocional (Lopez et al., 2024). Sobre esta línea, investigaciones como la de Blom y colaboradores destacan que los cuidadores profesionales, al estar expuestos a demandas continuas, pueden experimentar altos niveles de desgaste, lo cual a menudo se pasa por alto, lo que incluso lleva al debate académico sobre la conceptualización precisa del SDP, dificulta diferenciarlo de otros trastornos relacionados con el estrés y obstaculiza la comparación de resultados entre distintos estudios (Blom et al., 2023). Por otro lado, estudios como el de Martínez-Pérez sostienen que el SDP podría ser solo un nuevo término para

antiguos problemas, ya que comparte rasgos con varios constructos psicológicos como la depresión, debido al agotamiento y la falta de motivación, y con el estrés crónico, por la tensión sostenida (Martínez Pérez, 2010). También guarda similitudes con la fatiga por compasión, vinculada al desgaste en profesiones de ayuda, y con la insatisfacción laboral, aunque el SDP implica un malestar emocional más profundo (Martínez Pérez, 2010).

De esta manera, la detección de SDP en profesionales de la docencia y la investigación es fundamental, dado su impacto directo en el bienestar personal, familiar y laboral (Mora Galdón, 2020). Puede afectar el momento de asegurar la calidad de vida laboral, por lo que debe entenderse no sólo como una responsabilidad organizacional, sino también como un pilar esencial para promover el bienestar integral de los colaboradores.

Cabe señalar la frase atribuida a Confucio: *“Elige un trabajo que te guste y no tendrás que trabajar ni un día de tu vida”*. Esta reflexión resalta la necesidad de fomentar entornos laborales que garanticen la satisfacción, el desarrollo personal y la prevención del desgaste profesional.

SDP en el personal académico

El SDP constituye una problemática creciente en los entornos laborales contemporáneos, en particular en el ámbito de la docencia universitaria y la investigación científica. La evidencia revisada muestra que este sector enfrenta condiciones que incrementan la vulnerabilidad de sus profesionales: jornadas extensas, alta exigencia de resultados, presión constante por la productividad académica, escasez de recursos y cambios frecuentes en los liderazgos institucionales (Boone et al., 2022). Estas circunstancias no solo afectan la salud física y emocional de los investigadores, sino también la calidad de los proyectos, la estabilidad de los equipos y, en última instancia, el avance del conocimiento. Los hallazgos también señalan diferencias de género significativas. Las mujeres investigadoras presentan un mayor riesgo de padecer SDP debido a la “doble presencia”, es decir, la simultaneidad de roles laborales y familiares que, sumada a factores culturales, incrementa la carga emocional y limita la posibilidad de equilibrio personal y profesional (Redondo-Flórez et al., 2020). La despersonalización, la frustración, la fatiga crónica y la baja realización laboral se convierten en manifestaciones frecuentes que, de no ser atendidas, impactan negativamente tanto en el bienestar personal como en la productividad científica (Cadena-Povea et al., 2025; Fernández-Suárez et al., 2021).

SDP en el personal de salud: causas, manifestaciones y estrategias de afrontamiento

Las investigaciones recientes muestran que el SDP afecta principalmente a profesionales de la salud, sobre todo a médicos y enfermeros, debido a la atención directa a pacientes y familiares que atraviesan procesos de enfermedad.

El SDP con mayor presencia en las mujeres

Artz y colaboradores reportan que el 42% de las mujeres padece agotamiento (Artz et al., 2022), y el 32% un estado de SDP, sumado al rol que desempeña el género femenino, las mujeres presentan más dificultades para balancear el trabajo y la familia, sea por razones culturales o por la doble presencia en el trabajo y en la familia, así mismo se reportaron otras razones como lo fueron el poco crecimiento laboral, el mínimo desarrollo de habilidades u horarios de trabajo excesivos, altos niveles de exigencia por cumplir las labores asignadas (Artz et al., 2022), con esto se reafirma que las colaboradoras podrían llegar a distanciarse de su rol frente al trabajo, el cual nos llevaría a generar un estrés excesivo, llegando a experimentar frustración, fatiga, despersonalización, falta de eficacia y/o desvalorización personal (Jiménez Gómez et al., 2023).

De acuerdo con los patrones culturales, la mujer en la sociedad, en general, asume mayores cargas y responsabilidades, sin desmerecer que existan pequeñas excepciones de hombres que compartan responsabilidades y puedan asumir simultáneamente el rol de trabajador y de tareas domésticas (Purvanova & Muros, 2010). Lo anterior contrasta con lo reportado por Leka y colaboradores, donde se asocia que las mujeres son quienes presentan mayor riesgo de desarrollar SDP a causa de la exigencia de los diferentes roles que actualmente desempeña el género femenino, en los distintos ámbitos, y como tal, la esfera laboral presenta cada vez más responsabilidades que afectan a las mujeres trabajadoras, lo que deriva en un impacto en su salud física y/o mental, originando riesgos psicosociales, entre ellos el SDP (Leka et al., 2015).

Esta interacción constante, sumada a la responsabilidad en los tratamientos y a la necesidad de gestionar simultáneamente diversas situaciones y emociones, genera un desgaste que suele iniciarse en la residencia médica (Borges et al., 2021).

Por ello, el SDP se entiende hoy como un problema de salud mental que, si no se detecta a tiempo, puede comprometer seriamente la vida y la estabilidad emocional de quienes lo padecen (Mathkour et al., 2025). Algunos autores incluso lo consideran una crisis de autoeficacia, lo que ha generado debate en torno a su definición y conceptualización (Martínez Pérez, 2010).

Edú-Valsania y colaboradores (Edú-Valsania et al., 2022) plantearon que la personalidad influye de manera decisiva en cómo los trabajadores perciben y afrontan su entorno laboral. Con base

en el modelo de los cinco grandes rasgos (extraversión, neuroticismo, amabilidad, escrupulosidad y apertura a la experiencia). Esto significa que algunos individuos son más vulnerables al desgaste laboral, mientras que otros poseen recursos personales que los protegen, lo que refuerza la necesidad de intervenciones personalizadas. En ocasiones, el SDP se confunde con el estrés común, pero su carácter crónico y profundo lo convierte en una condición que puede replicarse en distintos equipos de trabajo si no se atiende adecuadamente (Maslach & Leiter, 2016) (Figura 2).



Figura 2. Factores de riesgo del síndrome de desgaste profesional y poblaciones afectadas. Integra factores organizacionales e individuales, como sobrecarga laboral, presión por productividad, inestabilidad institucional y demandas emocionales. Identifica las poblaciones más vulnerables, incluyendo personal de salud, docentes, investigadores y personal administrativo, con diferentes manifestaciones del síndrome según el contexto laboral (Elaborado en Power Point por Bravo-Benítez J., 2026).

El SDP en puestos administrativos

Los factores que influyen en el desarrollo de la carga mental y del SDP son las características del puesto y del ambiente de trabajo, los horarios y turnos laborales, la seguridad y la estabilidad en el trabajo, la incorporación de nuevas tecnologías, la estructura y el clima organizacional, las relaciones interpersonales, los salarios económicos y emocionales, entre otros (Medrano-Osorio et al., 2022). Todo esto puede traducirse en un mal ambiente laboral, en el que algunos trabajadores podrían cuestionar la remuneración que perciben. También se ha mostrado que el personal mal remune-

rado y sometido a una elevada carga de trabajo mental cuida menos la seguridad laboral y, a su vez, se ve profundamente afectado en su satisfacción laboral, lo que se traduce en una alta rotación y escasez de personal (Medrano-Osorio et al., 2022).

Otro factor importante es el estrés, un problema frecuente entre los empleados administrativos. Factores como la estructura de la organización, las reglas y la mala comunicación en el trabajo pueden causar estrés crónico (Dara et al., 2025). Por su parte el profesional administrativo está

sometido a diversos factores estresantes que afectan su desempeño laboral, y muchas veces provocando conflicto y ambigüedad de rol (Lin et al., 2025). El área administrativa también presenta exposición a estrés pues el cumplir con términos y plazos para dar ejecución a trámites importantes también desencadena conductas de estrés y agotamiento físico y emocional (Purvanova & Muros, 2010),

En un estudio realizado en el Hospital General IESS de Machala (Ecuador), la mayor prevalencia de SDP se observó en el grupo administrativo en comparación con el operativo (20.51% vs 14.75%) (Abdul Aziz & Ong, 2024). De la misma

manera, una empresa constructora realizó un estudio de riesgo psicosocial en el que se evidenció estrés crónico entre los trabajadores administrativos con modelo híbrido (presencial y/o a distancia) (Dara et al., 2025). Estos hallazgos permiten concluir que el área administrativa asume mayores responsabilidades en la organización y, en consecuencia, enfrenta niveles elevados de estrés que tienden a evolucionar hacia el SDP. El contraste entre géneros y áreas laborales muestra que las mujeres y el personal administrativo presentan un mayor riesgo, por lo que resulta necesario diseñar estrategias organizacionales de prevención y de cuidado de la salud psicosocial (Figura 3).



Figura 3. Estrategias de prevención e intervención del síndrome de desgaste profesional. Presenta acciones en niveles organizacional e individual, como rediseño de condiciones laborales, mejora del clima organizacional, políticas de equidad y reconocimiento. Incluye además programas de apoyo emocional, acceso a servicios de salud mental, formación en gestión del estrés y fortalecimiento de redes de apoyo (Elaborado en Power Point por Bravo-Benítez J., 2026).

Los riesgos del SDP

Las investigaciones coinciden en que en organizaciones sin estrategias para fortalecer la estructura, la motivación, la eficacia y el logro de objetivos, aumenta el riesgo de SDP en mujeres (Leka et al., 2015) (Figura 4).

Los estudios analizados en áreas administrativas y hospitalarias permiten inferir que los factores estructurales (horarios excesivos, escaso reconocimiento, mala comunicación interna y oportunidades de crecimiento limitadas) se replican en los centros de investigación, lo que confirma que

la ausencia de estrategias organizacionales de apoyo y prevención constituye un terreno fértil para el desarrollo del SDP. En este sentido, garantizar la calidad de vida del personal científico no debe considerarse sólo una responsabilidad ética, sino también un requisito indispensable para la sostenibilidad institucional y el fortalecimiento de la producción académica. La implementación de programas de prevención, detección temprana y acompañamiento emocional puede marcar una diferencia sustancial en la permanencia, la motivación y el compromiso de los investigadores.



Figura 4. Ejemplos del SPD en el personal profesional. Monika Wisniewska - stock.adobe.com
 Copyright: ©Monika Wisniewska - stock.adobe.com <https://impulsapopular.com/gerencia/rrhh/como-lidiar-con-el-sindrome-burnout-y-prevenir-el-desgaste-profesional/> <https://www.psonrie.com/noticias-psicologia/estar-quemado-o-sindrome-del-desgaste-profesional>

Conclusiones

El SDP en el personal de primera línea de atención representa un desafío urgente y multifactorial; su abordaje requiere acciones conjuntas entre investigadores, instituciones y políticas públicas, orientadas a construir entornos de trabajo saludables, equitativos y sostenibles, para asegurar la permanencia del talento académico-científico y fortalecer el papel de la docencia como motor del desarrollo social, económico y cultural.

- 1) Se requiere ampliar la investigación empírica en contextos científicos, pues la mayoría de los estudios actuales se centra en entornos hospitalarios o administrativos; a su vez, un análisis más profundo permitirá diseñar estrategias específicas de intervención para los investigadores.
- 2) Es necesario integrar la equidad de género en las políticas institucionales, brindar condiciones que faciliten la conciliación trabajo-familia, asegurar oportunidades de desarrollo profesional y promover la corresponsabilidad en las cargas domésticas, lo cual constituye un paso fundamental para reducir el impacto del SDP en las mujeres científicas.

3) La implementación de estrategias organizacionales de bienestar, que incluyan talleres de manejo de emociones, esquemas de mentoría académica, fortalecimiento de liderazgos positivos y reconocimiento del esfuerzo mediante incentivos tangibles e intangibles, uno de estos es el salario emocional (basado en la estabilidad, el reconocimiento, la participación en la toma de decisiones y el desarrollo profesional) constituye un recurso clave para disminuir la rotación y fomentar la motivación.

4) Replantear los indicadores de calidad académica: el éxito de la investigación no puede medirse únicamente por publicaciones o proyectos concluidos, sino también por las condiciones en que se genera ese conocimiento; la incorporación del bienestar del investigador como criterio de evaluación contribuirá a garantizar no solo la productividad, sino también la sostenibilidad e innovación a largo plazo.

Conflicto de intereses

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún conflicto de interés.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del escrito, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia. Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Descargo de Responsabilidad (Inteligencia Artificial) Los autores declaran por la presente que NO se han utilizado tecnologías de IA generativa, tales como modelos de lenguaje grandes (ChatGPT, COPILOT, etc.) y generadores de texto a imagen, durante la redacción o edición de este manuscrito.

DISCLAIMER (ARTIFICIAL INTELLIGENCE) Author(s) hereby declare that NO generative AI technologies such as Large Language Models (ChatGPT, COPILOT, etc.) and text-to-image generators have been used in the writing or editing of this manuscript.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) el financiamiento para los estudios de posgrado de los estudiantes Jazmín Zaragoza Alonso, José Muñoz Flores y Fátima Andrea Bonilla Ramos.

Referencias

- Abdul Aziz, A. F., & Ong, T. (2024). Prevalence and associated factors of burnout among working adults in Southeast Asia: results from a public health assessment. *Front Public Health*, 12, 1326227. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1326227>
- Artz, B., Kaya, I., & Kaya, O. (2022). Gender role perspectives and job burnout. *Review of Economics of the Household*, 20(2), 447-470. <https://doi.org/10.1007/s11150-021-09579-2>
- Bianchi, R., Schonfeld, I. S., & Laurent, E. (2015). Is it Time to Consider the "Burnout Syndrome" A Distinct Illness? [Perspective]. *Frontiers in Public Health*, Volume 3 - 2015. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2015.00158>
- Blom, C., Reis, A., & Lencastre, L. (2023). Caregiver Quality of Life: Satisfaction and Burnout. *International journal of environmental research and public health*, 20(16), 6577. <https://www.mdpi.com/1660-4601/20/16/6577>
- Boone, A., Vander Elst, T., Vandenbroeck, S., & Godderis, L. (2022). Burnout Profiles Among Young Researchers: A Latent Profile Analysis [Original Research]. *Frontiers in Psychology*, Volume 13 - 2022. <https://www.frontiersin.org/journals/psychology/articles/10.3389/fpsyg.2022.839728>
- Borges, E. M. d. N., Queirós, C. M. L., Abreu, M. d. S. N. d., Mosteiro-Díaz, M. P., Baldonado-Mosteiro, M., Baptista, P. C. P., Felli, V. E. A., Almeida, M. C. d. S., & Silva, S. M. (2021). Burnout among nurses: a multicentric comparative study. *Revista Latino-Americana de Enfermagem*, 29.
- Caballero Domínguez, C. C., Hederich, C., & Palacio Sañudo, J. E. (2010). El burnout académico: delimitación del síndrome y factores asociados con su aparición. *Revista latinoamericana de Psicología*, 42, 131-146. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-05342010000100012&nrm=iso
- Cadena-Povea, H., Hernández-Martínez, M., Bastidas-Amador, G., & Torres-Andrade, H. (2025). What Pushes University Professors to Burnout? A Systematic Review of Sociodemographic and Psychosocial Determinants. *International journal of environmental research and public health*, 22(8), 1214.
- Contreras, J. G., Rodríguez, A. U., & Gaviño, A. S. (2023). Comportamiento Organizacional para el Balance Integral Humano desde la NOM-035 en escenario post-pandemia COVID-19. *Revista Científica Empresarial Debe-Haber*, 1, 15-15.
- Dara, D., Febriantina, S., & Suwatno, S. (2025). Enhancing well-being in hybrid work: the crucial role of organizational support for Indonesia's State Civil Apparatus. *Cogent Psychology*, 12(1), 2454084. <https://doi.org/10.1080/23311908.2025.2454084>
- del Pilar Pulido-Ramírez, M., Almanza-Junco, C. A., Castillo-Vergara, M., & Sánchez Cárcamo, R. (2025). The impact of organizational cynicism on job satisfaction and performance: a study in Colombian SMEs. *Current Psychology*, 44(11), 10040-10054. <https://doi.org/10.1007/s12144-025-07861-5>
- Domingo Esteban, S., Pinto-Carral, A., & Rodríguez Nogueira, Ó. (2024). Satisfacción laboral, grado de burnout y calidad de vida profesional de los fisioterapeutas de atención hospitalaria de Castilla y León. *Fisioterapia*, 46(1), 11-19. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ft.2023.06.003>
- Edú-Valsania, S., Laguía, A., & Moriano, J. A. (2022). Burnout: A Review of Theory and Measurement. *International journal of environmental research and public health*, 19(3), 1780.
- Fernández-Suárez, I., García-González, M. A., Torrano, F., & García-González, G. (2021). Study of the Prevalence of Burnout in University Professors in the Period 2005–2020. *Education Research International*, 2021(1), 7810659. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2021/7810659>
- Gaviño Contreras, J., Ultreras Rodríguez, A., & Sánchez Gaviño, A. (2023). Comportamiento Organizacional para el Balance Integral Humano desde la NOM-035 en escenario post-pandemia COVID-19. *Revista Científica Empresarial Debe-Haber*, 1, 15. <https://doi.org/10.62939/debehaber202315>
- González Correales, R., Gándara Martín, J., & Flórez Lozano, J. (2002). Síndrome de burnout: ¿Qué podemos hacer. *Semergen*, 28, 18-38.
- Jiménez Gómez, L. J., Oñate Peralta, L. M., & Tatis Mendoza, M. F. (2023). Factores de riesgo psicosocial asociados al síndrome de burnout en trabajadores de la salud. *Revista Colombiana de Salud Ocupacional*, 13(2), e-10839. <https://doi.org/10.18041/2322-634X/rco.2.2023.10839>

- Leka, S., Jain, A., Iavicoli, S., & Di Tecco, C. (2015). An Evaluation of the Policy Context on Psychosocial Risks and Mental Health in the Workplace in the European Union: Achievements, Challenges, and the Future. *BioMed Research International*, 2015(1), 213089. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2015/213089>
- Lin, K.-H., Hsu, C.-C., & Lin, K.-Y. (2025). Job stress and burnout among hospital administrative staff: a cross-sectional study. *Scientific Reports*, 15(1), 31064. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-17209-5>
- Lopez, J., Perez-Rojo, G., Noriega, C., Sánchez-Cabaco, A., Sitges, E., & Bonete, B. (2024). Quality-of-life in older adults: its association with emotional distress and psychological wellbeing. *BMC Geriatrics*, 24(1), 815. <https://doi.org/10.1186/s12877-024-05401-7>
- Lovo, J. (2020). Síndrome de burnout: Un problema moderno. *Entorno*, 0(70), 110-120. <https://doi.org/10.5377/entorno.voi70.10371>
- Martínez Pérez, A. (2010). El síndrome de Burnout. Evolución conceptual y estado actual de la cuestión. *Vivat Academia*(112), 42-80. <https://doi.org/10.15178/va.2010.112.42-80>
- Maslach, C., & Leiter, M. P. (2016). Understanding the burnout experience: recent research and its implications for psychiatry. *World Psychiatry*, 15(2), 103-111. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/wps.20311>
- Mathkour, A., Alzahrani, A. H., Narapureddy, B. R., Alqahtani, F. M., Alshehri, A. M., Althagafi, M. A., Alsyd, S. M., Asif, S. M., & Vaddamanu, S. K. (2025). Prevalence and risk factors of burnout among employees at COVID-19 vaccination centers: A cross-sectional study. *PLoS One*, 20(5), e0322803. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0322803>
- Medrano-Osorio, G. P., Ramírez-Arellano, M. A., Ramírez-Arellano, E. J., & Zavala-Rosales, B. N. (2022). Carga mental de trabajo y agotamiento emocional en colaboradores de entidades financieras en la región Junín. *Gaceta Científica*, 8(2), 85-92. <https://doi.org/10.46794/gacien.8.2.1511>
- Mora Galdón, L. (2020). El síndrome de burnout en el trabajo: causas, consecuencias e intervenciones en las organizaciones. In: *Universitat Jaume I*.
- Olivares Faúndez, V. (2017). Laudatio: Dra. Christina Maslach, Comprendiendo el Burnout. *Ciencia & trabajo*, 19, 59-63. http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-24492017000100059&nrm=iso
- Polacov, S., Barrionuevo Battistini, I., Barroso, G., Cravero, B., D'Alessandro, T., Allende, G. E., Boni, S. R., Maldini, C. S., Pepe, G. A., & Gobbi, C. A. (2021). [Risk of Burnout syndrome in medical professionals in Cordoba City, Argentina]. *Rev Fac Cien Med Univ Nac Cordoba*, 78(4), 371-375. <https://doi.org/10.31053/1853.0605.v78.n4.28749> (Riesgo de Síndrome de Burnout en profesionales médicos de la ciudad de Córdoba, Argentina.)
- Purvanova, R. K., & Muros, J. P. (2010). Gender differences in burnout: A meta-analysis. *Journal of Vocational Behavior*, 77(2), 168-185. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jvb.2010.04.006>
- Redondo-Flórez, L., Tórner-Aguilera, J. F., Ramos-Campo, D. J., & Clemente-Suárez, V. J. (2020). Gender Differences in Stress- and Burnout-Related Factors of University Professors. *BioMed Research International*, 2020(1), 6687358. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2020/6687358>
- Salvagioni, D. A. J., Melanda, F. N., Mesas, A. E., González, A. D., Gabani, F. L., & Andrade, S. M. d. (2017). Physical, psychological and occupational consequences of job burnout: A systematic review of prospective studies. *PLoS One*, 12(10), e0185781. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185781>
- Serna Corredor, D. S., & Martínez Sánchez, L. M. (2020). Burnout en el personal del área de salud y estrategias de afrontamiento. *Correo Científico Médico*, 24, 372-387. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1560-43812020000100372&nrm=iso
- Torres-Vences, I. N., Pérez-Campos Mayoral, E., Mayoral, M., Pérez-Campos, E. L., Martínez-Cruz, M., Torres-Bravo, I., & Alpuche, I. (2022). Burnout Syndrome and Related Factors in Mexican Police Workforces. *International journal of environmental research and public health*, 19(9), 5537

Recepción: 11.12.2025

Revisión: 30.03.2026

Publicación: 08.05.2026

<https://orcid.org/0000-0003-0380-2917>

<https://orcid.org/0000-0002-0655-1503>

MÁS ALLÁ DE LA LUPA: INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA DETECTAR A TIEMPO EL CÁNCER ORAL

BEYOND THE MICROSCOPE: ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR THE EARLY DETECTION OF ORAL CANCER

Cybele Neves Moutinho*

Doctorado en Ingeniería del Lenguaje y
del Conocimiento

Facultad de Ciencias de la
Computación

Samantha Rivera Macías

Facultad de Estomatología

María Josefa Somodevilla García

Facultad de Ciencias de la Computación

Edif. CCO1, 14 Sur y San Claudio, C.U., Puebla, México

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), Puebla,
México

correos electrónicos:

cybele.neves@alumno.buap.mx

samantha.rivera@correo.buap.mx

maria.somodevilla@correo.buap.mx

*Autor(a) de correspondencia:

*cybele.neves@alumno.buap.mx

Resumen

El cáncer oral es una enfermedad que puede aparecer en los labios, la lengua, las encías o el paladar, y suele detectarse tardíamente. En estos casos, los tratamientos suelen ser más agresivos y las secuelas más graves. Sin embargo, cuando el problema se identifica a tiempo, las posibilidades de preservar la salud, la función y la calidad de vida aumentan significativamente. Por lo tanto, es fundamental prestar atención a la boca y buscar atención médica cuando algo no cicatriza o cambia de apariencia. En la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), el Laboratorio de Histopatología de la Facultad de Odontología analiza biopsias orales para confirmar o descartar el cáncer y guiar el tratamiento del paciente. Este trabajo diario ha dado lugar a una colaboración con la Facultad de Ciencias de la Computación, donde se investiga en inteligencia artificial para analizar imágenes de tejido oral. Mediante redes neuronales profundas, estos sistemas aprenden a reconocer patrones en preparaciones histológicas y pueden ayudar a los especialistas a detectar lesiones de alto riesgo de forma más temprana, organizar mejor los casos y optimizar el tiempo de los patólogos. El objetivo es que, en el futuro, esta combinación de experiencia clínica y tecnología ayude a brindar un diagnóstico oportuno a más personas y reducir el impacto del cáncer bucal en la comunidad.

Palabras clave: *cáncer oral, detección temprana, histopatología, inteligencia artificial, redes neuronales, LKE.*

Abstract

Oral cancer is a disease that can appear on the lips, tongue, gums, or palate, and it is often detected late. When this happens, treatments tend to be more aggressive and the aftereffects more severe. However, when the problem is identified early, the chances of preserving health, function, and quality of life increase significantly. Therefore, paying attention to your mouth and seeking medical attention when something doesn't heal or changes in appearance, is essential. At the Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), the Histopathology Laboratory of the Faculty of Dentistry analyzes oral biopsies to help confirm or rule out cancer and guide patient treatment. This daily work has led to a collaboration with the Faculty of Computer Science, where research is being conducted on artificial intelligence to analyze images of oral tissue. Using deep neural networks, these systems learn to recognize patterns in histological slides and can help specialists detect high-risk lesions earlier, better organize cases, and use pathologists' time more efficiently. The goal is that, in the future, this combination of clinical expertise and technology will help bring timely diagnosis to more people and reduce the impact of oral cancer on the community.

Keywords: *oral cancer, early detection, histopathology, artificial intelligence, neural networks, LKE.*

¿Por qué nos debe importar el cáncer oral?

El cáncer es hoy una de las principales causas de muerte en el mundo. En 2022 se estimaron cerca de 19,3 millones de nuevos casos y alrededor de 10 millones de defunciones por tumores malignos a nivel global (Organización Mundial de la Salud, 2022). En México, de acuerdo con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en 2022 se registraron 847,716 defunciones, y poco más de una de cada diez (10.6 %) se debió a distintos tipos de cáncer, así como aumento de la tasa de mortalidad por tumores malignos en la última década (INEGI, 2024).

En este panorama, el cáncer oral no es el más frecuente, pero sí representa un problema importante de salud pública. Afecta los tejidos de la cavidad bucal (Figura 1), como labios, lengua, encías, paladar y piso de boca, y forma parte del grupo de cánceres de cabeza y cuello, que representan alrededor de 5% de todos los cánceres en el mundo (Ferlay y otros, 2024). Los datos internacionales señalan cientos de miles de casos nuevos y muertes por cáncer oral cada año, con una proporción elevada de pacientes que fallecen a causa de esta enfermedad (Organización Mundial de la Salud, 2022).

En México, el Instituto Nacional de Cancerología (INCan) estima que la mortalidad a cinco años puede alcanzar hasta 50 % cuando el cáncer oral se diagnostica en etapas avanzadas (INCan, I. N. de C. , 2022). En cambio, cuando se detecta a tiempo y se trata de forma adecuada, la supervivencia a cinco años puede superar 80 % (Gallegos Hernández, 2022). Dicho en palabras sencillas: llegar temprano hace una gran diferencia en las posibilidades de seguir con vida y conservar la función y la calidad de vida.

A este reto clínico se suman problemas estructurales. En distintos informes se ha señalado que existe subregistro y calidad desigual en los datos sobre cáncer en México, lo que dificulta conocer con precisión cuántas personas enferman y mueren por cáncer oral (Torres Rosas y otros, 2021). También se ha documentado que las desigualdades sociales y territoriales se traducen en diferencias importantes en el acceso al diagnóstico y tratamiento oportunos (Flamand Gómez y otros, 2021). En otras palabras, no todas las personas tienen las mismas oportunidades de ser atendidas a tiempo.

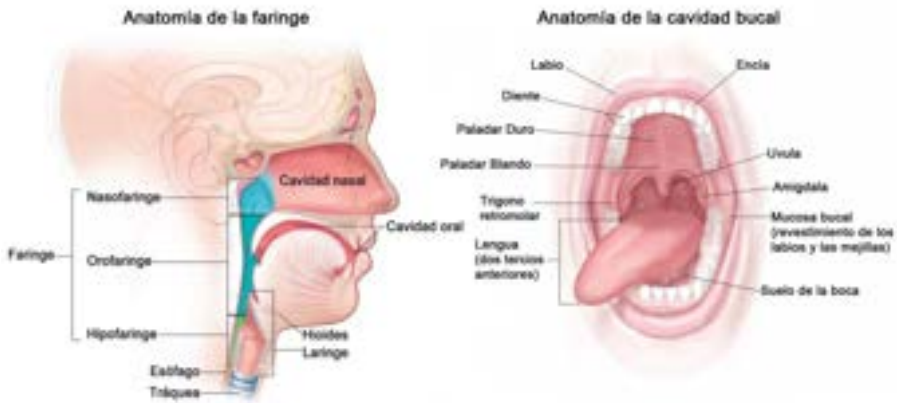


Figura 1. Anatomía de la orofaringe y cavidad bucal (Terese Winslow LLC, 2024).

De la boca al microscopio: ¿qué pasa cuando algo no se ve bien?

Muchas historias de cáncer oral comienzan con algo aparentemente pequeño: una llaga en la boca que no cicatriza, una mancha blanca o roja que no desaparece, un bulto o una zona que duele, sangra o molesta al masticar o hablar. Estas lesiones pueden ser procesos benignos, pero también pueden formar parte de las llamadas lesiones potencialmente malignas, que tienen mayor probabilidad de transformarse en cáncer si no se detectan y tratan a tiempo (War-nakulasuriya y otros, 2020).

El camino hacia el diagnóstico suele iniciar en el consultorio del estomatólogo o dentista, quien explora con cuidado la cavidad bucal, observa la apariencia de la lesión, palpa los tejidos y pregunta desde cuándo apareció el problema y si ha cambiado con el tiempo. Cuando existe sospecha, una de las herramientas más importantes es la biopsia: se toma una pequeña muestra del tejido alterado y se envía al laboratorio de patología. Allí se procesa, se corta en secciones muy delgadas, se tiñe con colorantes especiales como la hematoxilina y eosina (figura 2), y se observa al microscopio (Haj-Hosseini y otros, 2024).

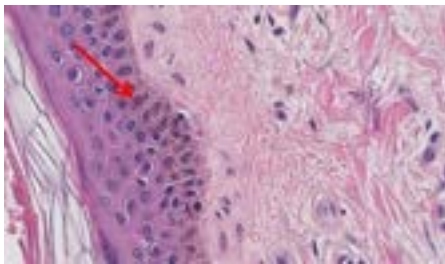


Figura 2. Imagen histopatológica de piel teñida con hematoxilina y eosina (H&E). Los núcleos se observan en púrpura y el citoplasma en rosa. La flecha roja señala una zona de células epiteliales con núcleos bien definidos. Fuente: adaptado de Leica Biosystems, "H&E Staining Overview: A Guide to Best Practices". URL: <https://www.leicabiosystems.com/knowledge-pathway/he-staining-overview-a-guide-to-best-practices/> (Sampias & Rolls, 2025).

Bajo el microscopio (figura 3), el patólogo compara la muestra con el aspecto de un tejido sano y busca señales de alarma: cambios en el tamaño y la forma de las células, alteraciones en los núcleos, pérdida del orden normal de las capas del epitelio o invasión hacia tejidos más profundos. Con base en estos hallazgos, determina si el tejido es normal, si hay distintos grados de displasia (cambios que indican riesgo) o si se trata ya de un carcinoma de células escamosas (Seoane y otros, 2008), figura 4.



Figura 3. Especialista en patología analizando una lámina de biopsia oral en el microscopio del Laboratorio de Histopatología. Fuente: elaboración propia.



Figura 4. CARCINOMA DE CÉLULA ESCAMOSA (de izquierda a derecha) 1. Úlcera 2. Estrato Córneo 3. Epidermis 4. Dermis 5. Hipodermis 6. Músculo 7. Célula Cancerígena 8. Queratinocito 9. Queratinocito Muerto 10. Bordes Duros Elevados (AIM, 2023).

Este procedimiento es el estándar para confirmar o descartar cáncer oral y orientar el tratamiento, pero también puede ser demandante en tiempo y recursos, sobre todo en lugares donde hay muchos casos y pocos especialistas. Además, en algunos aspectos (como la clasificación del grado de displasia) pueden existir diferencias entre observadores, incluso entre patólogos con experiencia, lo que ha sido documentado en la literatura (Kujan y otros, 2007).

El Laboratorio de Histopatología de la Facultad de Estomatología BUAP

En la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, la Facultad de Estomatología cuenta con un Laboratorio de Histopatología dedicado al estudio de estas biopsias orales. Bajo la responsabilidad de la Dra. Samantha Rivera Macías, en este laboratorio se reciben las muestras de pacientes atendidos en las clínicas de la Facultad, se procesan los tejidos, se preparan las láminas para el microscopio y se emiten los informes histopatológicos que ayudan a los equipos clínicos a decidir el mejor manejo para cada caso. La existencia de este servicio dentro de la facultad no solo beneficia de manera directa a los pacientes, sino que también crea un espacio para la formación de estudiantes y el desarrollo de proyectos de investigación en patología oral.

Un paso importante que se está dando a nivel mundial es la transición hacia la patología digital (Heffner y otros, 2025): la digitalización de las láminas histológicas para obtener imágenes de alta resolución que pueden verse en pantalla y ser analizadas por computadora. Esta digitalización abre la puerta al uso de herramientas de inteligencia artificial, que han mostrado un gran potencial para apoyar el análisis de imágenes médicas (Abels & Pantanowitz, 2017).

La inteligencia artificial en este contexto

Cuando se habla de inteligencia artificial en salud, no se trata de robots que sustituyen médicos, sino de programas capaces de aprender a reconocer patrones en datos complejos (Trask, 2019). Entre estas técnicas destacan las redes neuronales

profundas, y en particular las redes neuronales convolucionales, que son especialmente útiles para analizar imágenes (Chollet, 2021). En el caso de las biopsias orales, la idea es entrenar estos modelos con muchas imágenes histopatológicas previamente analizadas por especialistas, donde ya se sabe si el tejido es sano, si presenta una lesión de bajo o alto riesgo o si corresponde a un cáncer.

El modelo “ve” cada imagen muchas veces y ajusta sus parámetros internos hasta aprender qué características se repiten en cada tipo de tejido. Más adelante, cuando se le presenta una nueva imagen, puede sugerir a qué categoría se parece más y con qué probabilidad, por ejemplo, si se parece más a las imágenes que resultaron benignas o a las que correspondían a carcinoma (Das y otros, 2023).

En los últimos años, diversos grupos de investigación han aplicado estas técnicas al cáncer oral. Existen trabajos que han reportado precisiones cercanas a 90-95 % en la clasificación de imágenes histológicas de carcinoma oral mediante redes neuronales convolucionales, enfoques híbridos que mejoran la sensibilidad para detectar lesiones de alto riesgo (Ahmad y otros, 2023) y modelos entrenados con fotografías clínicas de la cavidad bucal que alcanzan porcentajes muy altos de acierto al identificar lesiones sospechosas (Wei y otros, 2024). Otros estudios han desarrollado modelos capaces de clasificar y segmentar distintos grados de carcinoma oral directamente en las imágenes histopatológicas (Musulin y otros, 2021).

Todo esto sugiere que la inteligencia artificial puede ser una aliada valiosa para el patólogo, especialmente en tareas como priorizar las láminas más sospechosas cuando hay muchos casos. Es importante insistir en que la inteligencia artificial no da el diagnóstico final ni decide qué tratamiento debe recibir una persona. La decisión sigue siendo responsabilidad del profesional de la salud, que conoce la historia clínica del paciente, sus otros estudios y su contexto. La función de estos sistemas es acompañar, no reemplazar: ayudar a organizar mejor la información, a detectar patrones y a reducir la carga de trabajo repetitiva, de modo que el especialista pueda concentrarse en los aspectos más complejos.

Importante para las comunidades con menos recursos

En un país con desigualdades tan marcadas como México, estas herramientas podrían tener un impacto especial en las comunidades que cuentan con menos recursos. En muchas zonas rurales o alejadas de las grandes ciudades, el acceso a servicios de patología es limitado y, en ocasiones, las muestras deben enviarse a laboratorios

lejanos, lo que alarga los tiempos de espera para obtener un diagnóstico (Flamand Gómez y otros, 2021). Si las láminas se digitalizan, un sistema de inteligencia artificial podría ayudar a ordenar y preclasificar los casos, mientras los patólogos revisan con más detalle aquellos que parecen más urgentes (Veeraraghavan y otros, 2024).

Una colaboración BUAP que mira hacia el futuro

La colaboración que se está construyendo entre las facultades de la BUAP va justamente en esta dirección. Desde el Doctorado en Ingeniería del Lenguaje y del Conocimiento (LKE) de la Facultad de Computación, la Mtra. Cybele Neves Moutinho trabaja en el desarrollo y evaluación de modelos de redes neuronales aplicados a imágenes histopatológicas orales, en estrecha coordinación con el Laboratorio de Histopatología de la Facultad de Estomatología. El laboratorio aporta la experiencia clínica y el acceso a las muestras, la Facultad de Computación contri-

buye con el diseño de los modelos, la programación y la infraestructura necesaria. En la figura 5 se observa el funcionamiento básico de un sistema de inteligencia artificial. Las imágenes se almacenan en una base de datos, se preprocesan, se extraen características y un clasificador las separa en imágenes normales y anormales. El objetivo común es, en el futuro, contar con herramientas que se integren de manera responsable a la práctica diaria, respetando siempre las normas éticas y de protección de datos, para que más personas reciban un diagnóstico oportuno.



Figura 5. Esquema general del sistema de inteligencia artificial para analizar las imágenes histopatológicas orales. Fuente: elaboración propia.

Mientras estos desarrollos avanzan, el mensaje central para la población sigue siendo muy claro: cualquier lesión en la boca que no cicatriza, cambia de color o causa molestias durante varias semanas debe ser revisada por personal de salud bucal. Consultar a tiempo puede marcar la dife-

rencia entre un tratamiento más sencillo y una enfermedad avanzada. La tecnología, incluida la inteligencia artificial, puede ayudar cada vez más, pero el primer paso siempre será que las personas se miren, se cuiden y acudan a consulta cuando algo no les parece normal.

Conflicto de intereses

Las autoras de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles del desarrollo de los modelos de inteligencia artificial, pueden compartirse a solicitud directa con la autora de correspondencia. Los pacientes están protegidos, sus datos están anonimizados y se respetan las normas éticas.

Los datos personales facilitados por las autoras a la revista RD-ICUAP se utilizarán exclusivamente para los fines establecidos por la propia revista, no estarán disponibles para otros propósitos ni serán proporcionados a terceros

Descargo de Responsabilidad (Inteligencia Artificial) Los autores declaran por la presente que NO se han utilizado tecnologías de IA generativa, tales como modelos de lenguaje grandes (ChatGPT, COPILOT, etc.) y generadores de texto a imagen, durante la redacción o edición de este manuscrito.

Agradecimientos

Las autoras agradecen a la Beca SECIHTI por el apoyo otorgado para el desarrollo de esta investigación en México. De igual forma, expresan su agradecimiento al director de la Facultad de Estomatología, Dr. Fernando de Jesús Martínez Arróniz, y al secretario administrativo, Dr. Antonio Andrade Torres, por su respaldo institucional y las facilidades brindadas para la realización de este trabajo.

Asimismo, agradecen al Dr. Francisco Hernández Pérez, especialista en patología, a Hilda García Sánchez, técnica de laboratorio, y a todo el equipo del Laboratorio de Histopatología por su profesionalismo, por la atención respetuosa y amable brindada a las y los pacientes.

Referencias

- Abels, E., & Pantanowitz, L. (2017). Current State of the Regulatory Trajectory for Whole Slide Imaging Devices in the USA. *Journal of Pathology Informatics*, 8(1), 23. https://doi.org/10.4103/jpi.jpi_11_17
- Ahmad, M., Irfan, M. A., Sadique, U., Haq, I. u., Jan, A., Khattak, M. I., . . . Alijuaid, H. (2023). Multi-Method Analysis of Histopathological Image for Early Diagnosis of Oral Squamous Cell Carcinoma Using Deep Learning and Hybrid Techniques. *Cancers*, 3(5247), 15. <https://doi.org/10.3390/cancers15215247>
- AIM. (2023). Cáncer de piel de células escamosas. Recuperado el febrero de 2025, de Skin Cancer Foundation: <https://aimatskincancer.org/es/about/international-page/latin-america/que-es-el-cancer-de-piel-de-celulas-escamosas-o-carcinoma-escamocelular/>
- Chollet, F. (2021). *Deep learning with Python*. Manning.
- Das, M., Dash, R., & Kumar M, S. (2023). Automatic Detection of Oral Squamous Cell Carcinoma from Histopathological Images of Oral Mucosa Using Deep Convolutional Neural Network. *Int J Environ Res Public Health*, 3(2131), 20. <https://doi.org/10.3390/ijerph20032131>
- Ferlay, J., Ervik, M., Lam, F., Laversanne, M., & Colombet, M. (2024). International Agency for Research on Cancer. Recuperado el febrero de 2025, de Global Cancer Observatory: Cancer Today: <https://gco.iarc.who.int/today>
- Flamand Gómez, L., Moreno Jaimes, C., & Arriaga Carrasco, R. (2021). *Cáncer y desigualdades sociales en México, 2020* (1 ed.). Ciudad de México: El Colegio de México. <https://doi.org/ISBN978-607-564-239-0>
- Gallegos Hernández, J. F. (2022). Cáncer de la cavidad oral. Un reto para la salud de la población mexicana en la próxima década. *Gaceta Mexicana de Oncología*, 11(2), 64-67. <https://doi.org/10.16659201>
- Haj-Hosseini, N., Lindblad, J., Hasséus, B., & Kumar, V. V. (2024). Early Detection of Oral Potentially Malignant Disorders: A Review on Prospective Screening Methods with Regard to Global Challenges. *Journal of Maxillofacial and Oral Surgery*, 23(1), 23-32. <https://doi.org/10.1007/s12663-022-01710-9>
- Heffner, S., Colgan, O., & Doolan, C. (2025). Patología digital. Recuperado el marzo de 2025, de Leica Biosystems Knowledge Pathway: <https://www.leicabiosystems.com/es/knowledge-pathway/digital-pathology/>
- INCan, I. N. de C. . (2022). Informe anual sobre incidencia y mortalidad del cáncer en México. . Obtenido de Secretaría de Salud, México: <http://incan.salud.gob.mx/index.html>
- INEGI. (2024). Estadísticas a propósito del Día Mundial contra el Cáncer. Recuperado el 24 de febrero de 2025, de Instituto Nacional de Estadística y Geografía: https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2024/EAP_CANCER24.pdf
- Kujan, O., Khattab, A., Oliver, R. J., Roberts, S. A., Thakker, N., & Sloan, P. (2007). Why oral histopathology suffers inter-observer variability on grading oral epithelial dysplasia: an attempt to understand the sources of variation. *Oral oncology*, 43(3), 224-231. <https://doi.org/10.1016/j.oraloncology.2006.03.009>
- Musulin, J., Štifanić, D., Zulijani, A., Čabov, T., Dekanić, A., & Car, Z. (2021). An Enhanced Histopathology Analysis: An AI-Based System for Multiclass Grading of Oral Squamous Cell Carcinoma and Segmenting of Epithelial and Stromal Tissue. *Cancers*, 13(8), 1784. <https://doi.org/10.3390/cancers13081784>

- Organización Mundial de la Salud. (2022). Organización Mundial de la Salud (OMS). Recuperado el 10 de febrero de 2025, de Cáncer: Datos y cifras clave sobre su incidencia, factores de riesgo y prevención a nivel mundial.: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/cancer>
- Sampias, C., & Rolls, G. (2025). H&E Staining Overview: A Guide to Best Practices. Recuperado el marzo de 2025, de Leica Biosystems Knowledge Pathway: <https://www.leicabiosystems.com/es/knowledge-pathway/he-staining-overview-a-guide-to-best-practices/>
- Seoane, J., G.-M. A., & Velo-Noya, J. (2008). La biopsia oral en el contexto del precáncer y del cáncer oral. *Avances en Odontoestomatología*, 24(1). Recuperado el marzo de 2025, de <https://scielo.isciii.es/pdf/odonto/v24n1/original8.pdf>
- Terese Winslow LLC. (2024). Medical and Scientific Illustration. Recuperado el marzo de 2025, de <https://www.teresewinslow.com/>
- Torres Rosas, R., Torres Gómez, N., Hernández Juárez, J., Pérez Cervera, Y., Hernández Antonio, A., & Argueta Figueroa, L. (2021). Epidemiología reportada de cáncer de labio, cavidad oral y orofaringe en México. *Revista Médica del Instituto Mexicano del Seguro Social*, 58(4), 494-507. <https://doi.org/10.24875/RMIMSS.M20000074>
- Trask, A. W. (2019). *Grokking Deep Learning*. Manning.
- Veeraraghavan, V. P., Daniel, S., Dasari, A. K., Aileni, K. R., patil, C., & Patil, S. R. (2024). Harnessing artificial intelligence for predictive modelling in oral oncology: Opportunities, challenges, and clinical Perspectives. *Oral Oncology Reports*, 11(100591). <https://doi.org/10.1016/j.oor.2024.100591>
- Warnakulasuriya, S., Kujan, O., Aguirre-Urizar, J. M., Bagan, J. V., González-Moles, M. Á., Kerr, A. R., . . . Mello, F. W. (2020). Oral potentially malignant disorders: A consensus report from an international seminar on nomenclature and classification, convened by the WHO Collaborating Centre for Oral Cancer. *Oral diseases*, 27(8), 1862-1880. <https://doi.org/10.1111/odi.13704>
- Wei, X., Chanjuan, L., Ke, J., Linyun, Y., Jinxing, G., & Quanbing, W. (2024). Convolutional neural network for oral cancer detection combined with improved tunicate swarm algorithm to detect oral cancer. *Scientific Reports*, 14(28675). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-79250-0>

Recepción: 09.12.2026

Revisión: 31.03.2026

Publicación: 08.05.2026

<https://orcid.org/0009-0007-6116-9263>

<https://orcid.org/0000-0002-9495-4678>

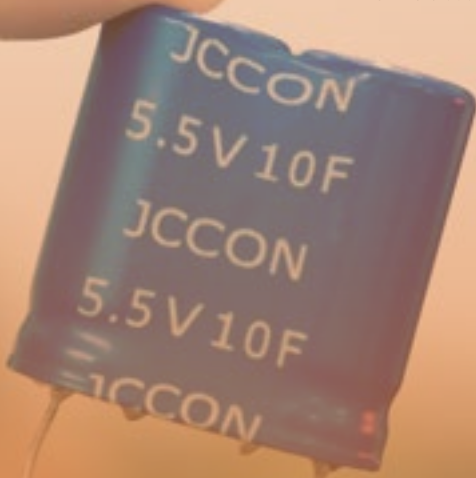
SUPERCAPACITORES NANOESTRUCTURADOS: OPORTUNIDADES DE NEGOCIO EN EL MERCADO DE LA ENERGÍA

NANOSTRUCTURED SUPERCAPACITORS: BUSINESS OPPORTUNITIES IN THE ENERGY MARKET

Ángela Méndez Méndez*
Jorge Alberto Galaviz Pérez

División Académica Multidisciplinaria de Jalpa de Méndez, Tabasco, México
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México.

Correos:
angelamendez16022@gmail.com
jorgegalavizperez@gmail.com



Resumen

La nanotecnología representa una de las fronteras más avanzadas de la ciencia contemporánea, ha transformado múltiples sectores entre ellos la electrónica y la energía debido a las propiedades únicas que proporcionan los nanomateriales. En los últimos años, los supercapacitores han emergido como una tecnología de almacenamiento energético complementaria a las baterías convencionales. Los supercapacitores (sCs) nanoestructurados combinan una alta potencia, rápidos procesos de carga/descarga y una vida útil más prolongada, todo esto mediante el uso de materiales a escala nanométrica como lo son (grafeno, nanotubos de carbono, óxidos metálicos, polímeros conductores). El implemento de estas mejoras técnicas abre paso a grandes vías comerciales en cuestión de electrónica industrial, movilidad y redes eléctricas. Sin embargo, la exploración comercial exige superar retos como la densidad energética, normas técnicas, costos de material y producción. Este artículo analiza los avances recientes en (sCs) nanoestructurados, sintetiza el estado del arte técnico, así como los retos tecnológicos y comerciales que aún deben superarse.

Palabras clave: Nanotecnología, Energías, Almacenamiento de energía, Supercapacitores, Innovación, Materiales avanzados, Mercados energéticos.

Abstract

Nanotechnology represents one of the most advanced frontiers of contemporary science; it has transformed multiple sectors, including electronics and energy, due to the unique properties provided by nanomaterials. In recent years, supercapacitors have emerged as a complementary energy storage technology to conventional batteries. Nanostructured supercapacitors (sCs) combine high power, fast charge/discharge processes, and a longer service life, all of which use nanoscale materials such as graphene (carbon nanotubes, metal oxides, conductive polymers). The implementation of these technical improvements opens the way to major commercial routes in terms of industrial electronics, mobility, and electrical networks. However, commercial exploration requires overcoming challenges such as energy density, technical standards, material costs, and production. This article analyzes recent advances in nanostructured (sCs), synthesizes the technical state of the art, as well as the technological and commercial challenges that still need to be overcome.

Keywords: Nanotechnology, Energy, Energy storage, Supercapacitors, Innovation, Advanced materials, Energy markets.

Introducción

Los (sCs) nanoestructurados son dispositivos avanzados de almacenamiento de energía que se caracterizan por su capacidad rápida de carga/descarga, larga vida útil y su alta eficiencia. Estos dispositivos se diferencian de los condensadores y baterías tradicionales, lo cual mejora significativamente sus propiedades, como la densidad de energía y la estabilidad durante ciclos repetidos.

La creciente demanda mundial de energía, junto con el cambio hacia fuentes más renovables, ha generado un interés en tecnologías de almacenamiento energético eficientes y sostenibles. En este contexto, los supercapacitores (sCs) se presentan como una alternativa viable gracias a su capacidad de suministrar picos de potencia en tiempos muy cortos, su elevada vida útil y la seguridad operativa.

Sin embargo, una de sus principales limitaciones históricas ha sido su baja densidad energética en comparación con las baterías convencionales de ión-litio, para mitigar esta desventaja, en los últimos años se han incorporado nanoestructuras avanzadas en los electrodos, logrando incrementos significativos en la capacidad de almacenamiento y estabilidad (Zhang, 2020). Estas mejoras han abierto nuevas oportunidades de negocio en sectores estratégicos como los sistemas de respaldo energético, movilidad eléctrica y la integración de energías renovables en redes inteligentes.

Los recientes avances en los materiales nanoestructurados han permitido superar muchas limitaciones históricas de los supercapacitores, como en capacitancia específica, estabilidad y conductividad, como destacan (Gao, 2021).

Además, el desarrollo de electrolitos innovadores, como los líquidos iónicos, ha ampliado la ventana electroquímica y la seguridad operativa de los dispositivos (Salanne, 2017). Por otra parte, la diferenciación entre el comportamiento doble capa y pseudocapacitancia ha

sido crucial para comprender los mecanismos de almacenamiento y diseñar electrodos de mayor eficiencia (Brousse, 2015). En cuanto a su operación, los principios fundamentales de transporte iónico y separación de cargas continúan basándose en modelos electroquímicos clásicos descritos por (Kötz, 2000), que siguen vigentes en aplicaciones industriales actuales.

Los supercapacitores se dividen principalmente en:

1. **Supercapacitores de doble capa eléctrica (EDLCs)**, donde el almacenamiento se produce por separación de cargas en la interfaz electrodo-electrolito, son contruidos por carbono altamente poroso, dando como resultado una superficie con una amplia relación de volumen.
2. **Pseudocapacitores**, en los que intervienen procesos faradaicos a través de la transferencia de cargas entre un electrodo y un electrolito que rápidamente aumenta la capacidad específica.

La incorporación de los materiales nanoestructurados permite el aumento de la superficie activa, mejorando la conductividad y el fácil transporte iónico, produciendo un mejor rendimiento electroquímico

Materiales nanoestructurados en supercapacitores

Grafeno y derivados

El grafeno es uno de los materiales más investigados por su elevada conductividad eléctrica y área superficial. Estas propiedades permiten una alta accesibilidad iónica y un transporte electrónico eficiente; su combinación de óxidos metálicos y polímeros conductores ha permitido mejorar la capacidad y estabilidad cíclica de los electrodos, lo que lo convierte en un candidato clave para aplicaciones avanzadas en los supercapacitores. (Stoller, 2008)

Nanotubos de carbono (CNTs)

Poseen una estructura tubular con destacadas propiedades eléctricas y mecánicas, además los CNTs pueden actuar como andamiaje para otros materiales activos. Son utilizados como redes conductoras para el mejoramiento de la integridad mecánica y hacer más eficiente el transporte electrónico. (Frackowiak, 2001)

Óxidos metálicos y polímeros conductores

Los óxidos metálicos como (MnO_2 , RuO_2) y los polímeros conductores (polianilina, polipirrol) ofrecen elevadas capacitancias pseudocapacitivas, aunque su baja conductividad intrínseca limita su aplicación directa. No obstante, requieren de la integración de carbonos para superar problemas de conductividad ampliando el rango de aplicaciones potenciales. (Conway, 2013).

Propiedades de los materiales para sCs

Tabla 1. Propiedades comparativas de materiales para sCs autoría propia.

PROPIEDADES COMPARATIVAS DE MATERIALES sCs			
MATERIAL	CAPACITANCIA TÍPICA (F / g)	VENTAJAS	LIMITACIONES
Grafeno	200-300	Alta conductividad y área superficial	Costo elevado, producción a escala
CNTs	150-250	Integridad estructural, buena conductividad	Dificultad de dispersión homogénea
Óxidos / Poli- meros	400-700	Alta capacitancia pseudocapacitiva	Baja conductividad intrínseca

Fuente: Elaboración propia con base en información de (Stoller, 2008),(Frackowiak, 2001), (Conway, 2013) y (Gao, 2021).

Electrolitos avanzados para supercapacitores

Los electrolitos determinan la ventana de potencial, la estabilidad térmica y la seguridad de operación. Los líquidos iónicos se consideran una alternativa prometedora debido a su baja volatilidad, estabilidad electroquímica y

capacidad para operar voltajes más altos que los electrolitos acuosos u orgánicos tradicionales (Salanne, 2017). Esto permite obtener supercapacitores más seguros y con una mayor densidad energética sin comprometer la vida útil.

Tendencias tecnológicas en diseño de electrodos

La comprensión de los mecanismos pseudocapacitivos ha impulsado la fabricación de electrodos híbridos que combinan materiales de doble capa y materiales faradaicos. (Brousse, 2015) subraya

que el diseño racional de estructuras jerárquicas permite optimizar simultáneamente el transporte iónico y la conductividad eléctrica, lo cual es indispensable para la aplicación de alta demanda.

Avances en manufactura y escalabilidad

La transición de supercapacitores experimentales a productos comerciales requiere procesos de síntesis reproducibles, escalables y de bajo costo. (Gao, 2021) indican que las

rutas de síntesis hidrotermal, procesos sol-gel y depósito en fase vapor son los métodos con mayor potencial industrial por su eficiencia y control estructural.

Aplicaciones energéticas

Los supercapacitores nanoestructurados encuentran aplicaciones en:

- **Energías renovables:** pueden almacenar y liberar energía de fuentes como los paneles solares o fuentes eólicas ayudando a garantizar un suministro eléctrico más estable y gestionando el rendimiento de la red eléctrica.
- **Electrónica de consumo:** alimenta dispositivos electrónicos ofreciendo una gestión eficiente de la energía y permitiendo el desarrollo de supercapacitores flexibles para los dispositivos portátiles.
- **Automatización Industrial:** contribuyen en la eficiencia energética de las fábricas y los procesos industriales, los cuales necesitan ciclos de carga/descarga rápidos y repetitivos.
- **Movilidad eléctrica:** recuperación de la energía en frenado regenerativo, arranques rápidos y sistemas de almacenamiento híbrido.

Ventajas y desventajas de los supercapacitores

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Alta Densidad de Potencia: Los supercapacitores pueden entregar grandes cantidades de energía en un corto periodo de tiempo, lo que los hace ideales para aplicaciones que requieren picos de potencia, como los sistemas de frenado regenerativo en vehículos eléctricos.	Baja Densidad de Energía: Aunque los supercapacitores tienen una alta densidad de potencia, su densidad de energía es menor en comparación con las baterías tradicionales, lo que significa que no pueden almacenar tanta energía por unidad de peso o volumen.
Carga y Descarga Rápidas: Gracias a la capacitancia de doble capa, los supercapacitores se pueden cargar y descargar en cuestión de segundos o minutos, superando significativamente los tiempos de carga de las baterías tradicionales.	Costo Elevado: Los materiales nanoestructurados, como el grafeno y los óxidos metálicos, pueden ser costosos de producir, lo que incrementa el precio final de los supercapacitores.
Larga Vida Útil: Los supercapacitores nanoestructurados tienen la capacidad de soportar cientos de miles de ciclos de carga y descarga sin perder su eficiencia, lo que se traduce en una mayor vida útil comparado con otros dispositivos de almacenamiento de energía.	Autodescarga Alta: Los supercapacitores tienden a sufrir de una tasa de autodescarga más alta que las baterías convencionales, lo que significa que pueden perder energía con mayor rapidez cuando no están en uso.
Estabilidad Térmica: Estos dispositivos son más estables a diferentes temperaturas, lo que les permite operar en condiciones extremas sin sufrir deterioro significativo.	Baja Tensión de Operación: La tensión máxima de los supercapacitores suele ser baja, lo que requiere conectar varios dispositivos en serie para aplicaciones que necesiten altos voltajes, aumentando la complejidad del sistema.

Figura 1. Cuadro comparativo de ventajas y desventajas del uso de supercapacitores nanoestructurados autoría propia, datos: (Balderas Soto, 2023)

Modelos de negocio y estrategias comerciales

El crecimiento del mercado global de almacenamiento energético ha impulsado la necesidad de crear modelos de negocio que sean innovadores y permitan la adopción de tecnologías emergentes como lo son los supercapacitores nanoestructu-

rados. Diferente a las baterías de Ion-Litio, cuyo modelo de negocio está bien establecido, los supercapacitores requieren de enfoques más flexibles que se adapten a su papel complementario del sistema energético.

Modelos de negocio predominantes

El mercado de los supercapacitores nanoestructurados (sCNs) ha adoptado diversos modelos de negocio que responden tanto a las exigencias tecnológicas como a las dinámicas económicas del sector energético. Estos modelos buscan equilibrar innovación, viabilidad financiera y escalabilidad industrial, considerando que la manufactura de nanomateriales avanzados implica costos elevados, largos periodos de desarrollo y barreras regulatorias en sectores como automoción y energía renovable.

1. **Modelo OEM/B2B (Integración directa con fábricas de equipos).** Consiste en vender supercapacitores o módulos completos directamente a fabricantes de equipos (vehículos, maquinaria, energías renovables), quienes integran el producto en sus sistemas. Es el modelo más utilizado por empresas tecnológicas orientadas al mercado industrial.
2. **Modelo de sistemas híbridos (supercapacitor + batería).** Combina supercapacitores con baterías para mejorar el rendimiento, prolongar la vida útil y reducir costos operativos. El negocio se centra en comercializar sistemas completos optimizados para sectores como vehículos eléctricos y almacenamiento energético.
3. **Licenciamiento tecnológico (Technology Licensing Model).** Implica transferir o vender derechos de uso de patentes, procesos de fabricación, materiales o software a empresas con capacidad de producción masiva. El licenciante genera ingresos por regalías y el licenciataria accede a tecnología avanzada sin invertir en I+D propia.
4. **Energy as a Service (EaaS) aplicado a supercapacitores.** Modelo en el que el cliente no compra el supercapacitor, si no el servicio energético que este provee (respaldo, estabilización, gestión de

picos). Transforma la inversión inicial en un pago recurrente, ideal para industrias y centros de datos.

5. **Modelo de plataforma energética o Integración en infraestructura.** Integra supercapacitores, software, sensores e inteligencia artificial en un solo sistema, ofreciendo soluciones completas de gestión energética. El negocio se basa en vender no solo el dispositivo, sino un ecosistema de servicios avanzados.
6. **Modelo de fabricación por contrato (Contract Manufacturing Organization, CMO).** Consiste en que una empresa externa produce los supercapacitores o componentes avanzados para una empresa que posee la tecnología pero no la capacidad industrial. Reduce costos y acelera la entrada al mercado para startups y desarrolladores de nanomateriales.
7. **Modelo de economía circular (Circular Business Model).** Enfocado en el reciclaje, recuperación y reutilización de materiales y dispositivos, ofreciendo productos reacondicionados o materias primas recuperadas. Reduce costos, minimiza residuos y mejora la sostenibilidad del proceso productivo.

Venta directa de dispositivos: uno de los puntos más importantes es la fabricación y comercialización de supercapacitores como productos terminados para las aplicaciones en movilidad eléctrica, electrónica de consumo y redes inteligentes. Empresas como Maxwell Technologies y Skeleton Technologies han seguido este modelo con un gran éxito inicial.

Integración en soluciones híbridas.

Los (sCNs) pueden combinarse con baterías de Ion-Litio para ofrecer sistemas de almacenamiento con una alta densidad de potencia y una buena densidad energética. Este modelo es muy

atractivo para los fabricantes de vehículos eléctricos, autobuses y trenes eléctricos que requieren arranques rápidos y grandes ciclos de carga.

Licenciamiento tecnológico

Centros de investigación desarrollan nanomateriales avanzados y licencian sus tecnologías a corporativos. Este enfoque reduce la brecha entre la investigación académica y las aplicaciones comerciales.

Análisis del mercado global de supercapacitores

Los actores clave que operan en el mercado de supercapacitores son Maxwell Technologies (EE. UU.), LS Materials (Corea del Sur), Nippon Chemi-Con Corporation (Japón) y CAP-XX (Australia). Estas empresas cuentan con una amplia cartera de productos y una sólida presencia geográfica.

Este ecosistema está compuesto por numerosos actores, como proveedores de materiales, fabricantes de componentes y proveedores de tecnología, cada uno de los cuales desempeña un papel crucial en el desarrollo, la integración y la comercialización de soluciones avanzadas de almacenamiento de energía. (MarketsandMarkets., 2025).(Figura 2).



Figura 2. Ecosistema del mercado global de supercondensadores (MarketsandMarkets., 2025)

Estrategias comerciales

Según (Baumgarte, 2020) , los modelos de negocios en almacenamiento energético deben considerar estrategias de diferenciación, alianzas y estabilidad para lograr rentabilidad y encontrar un nicho específico y posicionar los (sCs) en el mercado. Las estrategias comerciales para la adopción y posicionamiento de los supercapacitores nanoestructurados se encuentran en una fase de evolución acelerada, impulsadas por el crecimiento de la electrificación global y la demanda de soluciones de almacenamiento rápido. Las empresas del sector están adoptando modelos híbridos de comercialización, alianzas estratégicas y esquemas de valor agregado para introducir la tecnología en mercados competitivos.

Una estrategia clave en mercados regulados es la obtención de certificaciones internacionales de calidad y sostenibilidad, como ISO 14001, IEC 62899 o UL 810^a, que fortalecen la credibilidad del producto y abren puertas a licitaciones gubernamentales y proyectos de infraestructura energética. Estas certificaciones también permiten posicionar a los supercapacitores como tecnologías verdes, un factor de creciente importancia en políticas públicas y fondos de inversión con lineamientos ESG. (Figura 3)

Barreras, riesgos y desafíos técnico/comerciales

El desarrollo y la adopción de supercapacitores (sCs) nanoestructurados en el mercado energético presentan múltiples oportunidades, pero también enfrentan grandes barreras que deben ser abordadas para garantizar su escalabilidad en el mercado.

Los costos elevados en la producción de la síntesis de los nanomateriales como grafeno, nanotubos de carbono y óxidos metálicos representan un obstáculo crítico. Según (Zhang, 2020), la falta de métodos de producción masiva a bajo costo limita la competitividad de estas tecnologías frente a las baterías convencionales cuya infraestructura y manufactura ya se encuentran consolidadas.

Desde la perspectiva comercial, la falta de estandarización y normativas técnicas internacionales genera incertidumbre en la adopción industrial. (Baumgarte, 2020), señalan que la ausencia de marcos regulatorios claros dificulta el diseño de modelos de negocio sostenibles y la atracción de inversión privada en el sector. Asimismo, existe un riesgo de percepción de

mercado: muchos consumidores y tomadores de decisiones desconocen las ventajas diferenciales de los supercapacitores, lo que retrasa su adopción masiva. En este sentido, Yang et al. (2022) destacan que la difusión de información técnica y el establecimiento de políticas públicas de apoyo son elementos clave para superar estas barreras.



Figura 3. Estrategias comerciales emergentes para los supercapacitores autoría propia, datos: (Baumgarte, 2020)

Retos comerciales

Pese a todas las oportunidades que se vislumbran para los supercapacitores, también existen desafíos que pueden limitar la expansión de los (sCs), entre ellos:

- Altos costos de producción en el proceso de la fabricación de nanomateriales avanzados.
- Falta de estandarización en los parámetros técnicos y normativos internacionales.
- Competencia contra las baterías de Ion-Litio, cuya infraestructura de producción y logística ya se encuentra consolidada.
- En cuanto a la percepción del mercado, aún se desconocen las ventajas en comparación con las tecnologías tradicionales.

Perspectiva de negocio

El mercado de supercapacitores se encuentra en expansión con una tasa de crecimiento anual compuesta proyectada entre 15% y el 19% hacia 2030. Según (MarketsandMarkets, 2025), se proyecta que el tamaño del mercado global pase de aproximadamente USD 1.35 mil millones en 2025 a USD 2.84 mil millones para el año 2030, con una tasa compuesta anual de crecimiento del 16,1% durante ese periodo. Las oportunidades más relevantes incluyen: integración en vehículos híbridos y buses eléctricos, recuperación de energía en frenado regenerativo y sistemas de arranque que demandan altos picos de potencia, soluciones de almacenamiento en plantas fotovoltaicas y eólicas para suavizar la variabilidad de generación, mejorar la estabilidad de la red y así ofrecer respaldo energético en momentos de alta demanda.



Figura 4. Tamaño de mercado de supercapacitores proyección de 2025-2030 (MarketsandMarkets., 2025)

El análisis realizado evidencia que los supercapacitores (sCs) nanoestructurados presentan ventajas competitivas frente a las baterías de ión-litio en aplicaciones donde se requiere una alta potencia y ciclos prolongados de carga. Por lo tanto, su papel es complementario dentro de los métodos de almacenamiento energético.

Presentan grandes oportunidades de negocios en cuestiones de movilidad eléctrica y energías renovables, aunque los costos de producción de los nanomateriales, la escalabilidad de procesos y la falta de estandarización técnica aún son retos críticos que deben superarse.

Por lo tanto, la combinación de los supercapacitores (sCs) nanoestructurados con las baterías en sistemas híbridos representa una estrategia prometedora para el incremento de la competitividad de ambas tecnologías.

Perspectivas futuras

Las perspectivas futuras en el campo de los supercapacitores nanoestructurados indican un camino prometedor impulsado por la evolución de materiales avanzados, procesos de síntesis sostenibles y nuevas arquitecturas de electrodos.

Se espera que investigaciones futuras se centren en desarrollar materiales híbridos capaces de combinar altas densidades de energía y potencia sin comprometer la estabilidad cíclica, especialmente mediante la integración de MXenes funcionalizados, grafeno dopado y polímeros conductores mejorados. Asimismo, el perfeccionamiento de electrolitos verdes, incluyendo líquidos iónicos de bajo costo y geles poliméricos avanzados, permitirá ampliar la venta operacional y mejorar la seguridad de los dispositivos.

Por otro lado, la manufactura a gran escala constituye un área prioritaria, por lo que se prevé un aumento en el uso de técnicas como la impresión aditiva, la síntesis hidrotermal continua y el depósito asistido por plasma para reducir costos y mejorar la reproducibilidad. En términos comerciales, la implementación de modelos de negocio como *Energy as a Service* y la integración de supercapacitores en microrredes inteligentes abrirá nuevas oportunidades para su adopción.

Estas perspectivas sugieren que los supercapacitores nanoestructurados tienen un futuro sólido, siempre que se aborden de manera integral las brechas tecnológicas y las barreras económicas actuales.

Análisis crítico de los autores

La literatura analizada demuestra un consenso general respecto al potencial de los supercapacitores nanoestructurados, pero simultáneamente expone inconsistencias, retos no resueltos y contradicciones relevantes entre los distintos enfoques de investigación.

Los trabajos clásicos como los de (Conway, 2013) y (Frackowiak, 2001) establecen las bases electroquímicas fundamentales, describiendo mecanismos de doble capa y procesos pseudocapacitivos que siguen siendo válidos en investigaciones modernas. Sin embargo, a pesar de este marco conceptual sólido, la literatura reciente aún presenta dificultades para estandarizar definiciones y separar con claridad los fenómenos electroquímicos, tal como señala (Brousse, 2015), lo que genera una falta de uniformidad al comparar resultados experimentales.

En cuanto al avance en materiales, investigaciones como las de (Stoller, 2008) y (Gao, 2021) demuestran mejoras sustanciales en capacitancia, estabilidad y conductividad mediante el uso de grafeno, nanotubos y MXenes. No obstante, tales mejoras suelen derivarse de condiciones específicas de laboratorio que no

necesariamente se mantienen bajo procesos de producción a gran escala. Esto indica una brecha importante entre el rendimiento teórico y viabilidad industrial, especialmente en materiales de alto costo o difícil síntesis.

Autores como (Salanne, 2017) proponen el uso de líquidos iónicos para extender la ventana electroquímica y mejorar la sostenibilidad, pero aunque estos electrolitos ofrecen ventajas evidentes en seguridad y rendimiento, también presentan altos costos, baja disponibilidad en algunos mercados y desafíos de compatibilidad con ciertos electrodos.

Por otra parte, (MarketsandMarkets, 2025) y (Liu, 2010) destacan la creciente relevancia comercial de los supercapacitores, especialmente en movilidad eléctrica, energías renovables y respaldo industrial. Sin embargo, los reportes de mercado suelen asumir escenarios de rápida adopción que no siempre consideran los retos técnicos identificados en la literatura científica, como degradación estructural, costos elevados de producción y falta de estandarización tecnológica; esto genera tensión entre el optimismo comercial y la realidad tecnológica.

La mayoría de la literatura revisada prioriza resultados electroquímicos prometedores, pero suelen abordar de manera limitada aspectos claves como: impacto ambiental de la síntesis, reciclabilidad, requerimientos regulatorios, costos de manufactura o disponibilidad de materias primas en mercados globales.

Aunque el conjunto de referencias coincide en que los supercapacitores nanoestructurados tienen un papel estratégico dentro de la transición energética, también dejan claro que su implementación masiva dependerá de la capacidad de integrar avances científicos con modelos de negocios viables, cadenas de suministros sostenibles y procesos de manufactura escalables. En este sentido, el desarrollo futuro requiere un enfoque integral que combine investigación de materiales, ingeniería industrial, economía energética y políticas de innovación.

Conclusiones

Los supercapacitores nanoestructurados presentan una interacción atractiva entre los avances materiales y las necesidades del mercado energético moderno: alta potencia, durabilidad y respuesta instantánea. Las oportunidades de negocios son reales y amplias.

La colaboración entre centros de investigación, empresas emergentes, sector gubernamental y grandes corporativos será esencial para convertir los avances científicos en modelos de

negocio rentables y sostenibles, logrando así posicionar a los supercapacitores como piezas fundamentales en la transición energética.

Las oportunidades de negocio son bastantes y se encuentran respaldadas por un mercado con crecimiento acelerado. Sin embargo, la reducción de costos, sin bajar la calidad en cuanto al rendimiento energético y la estandarización de los procesos serán factores determinantes para consolidar su adopción masiva.

Conflicto de intereses

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Descargo de Responsabilidad (Inteligencia Artificial) Los autores declaran por la presente que NO se han utilizado tecnologías de IA generativa, tales como modelos de lenguaje grandes (Chat GPT, COPILOT, etc.) y generadores de texto a imagen, durante la redacción o edición de este manuscrito.

Agradecimientos

A los docentes y asesor por el apoyo brindado durante la formación académica.

Referencias

- Balderas Soto, M. A. (2023). Desarrollo de supercapacitores utilizando aleaciones metálicas y compuestos de carbono (Tesis de maestría). [Universidad de origen no especificada].
- Baumgarte, F., Glenk, G., & Rieger, A. (2020). Business models and profitability of energy storage. *iScience*, 23 (10), Article 101554. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101554>
- Brousse, T., Bélanger, D., & Long, J. W. (2015). To be or not to be pseudocapacitive? *Journal of The Electrochemical Society*, 162 (5), A5185–A5189.
- Conway, B. E. (2013). *Electrochemical supercapacitors: Scientific fundamentals and technological applications*. Springer.
- DOE (U.S. Department of Energy). (2023). Findings from Storage Innovations 2030: Supercapacitors. Recuperado de <https://energy.gov>
- Frackowiak, E., & Béguin, F. (2001). Carbon materials for the electrochemical storage of energy in capacitors. *Carbon*, 39 (6), 937-950.
- Gao, Q., Zhang, S., & Li, L. (2021). Advances in nanostructured electrode materials for high-performance supercapacitors. *Materials Today*, 45, 93–118.
- Hurtado Solórzano, P. G. (2021). Síntesis y caracterización de polipirrol con sustrato de caucho sobre fibras de carbono como electrodos en un supercondensador [Tesis de pregrado o maestría, universidad no especificada].
- Kötz, R., & Carlen, M. (2000). Principles and applications of electrochemical capacitors. *Electrochimica Acta*, 45 (15-16), 2483–2498.
- Liu, C., Li, F., Ma, L. P., & Cheng, H. M. (2010). Advanced materials for energy storage. *Advanced Materials*, 22 (8), E28–E62.
- MarketsandMarkets. (2025). Supercapacitor market size, share & industry growth analysis 2032. Recuperado de <https://www.marketsandmarkets.com>
- Markets and Markets. (2025). "Supercapacitor market by type (double-layered capacitors, pseudocapacitors, hybrid capacitors), electrode material, application (automotive, industrial, energy, consumer electronics), region - global forecast to 2030". Recuperado de <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/supercapacitor-market-37140453.html>
- Méndez, E. F., Arrobo, E. V., & Morochó, A. F. (2020). Supercapacitores como aporte al desarrollo energético eléctrico: Análisis comparativo mediante herramientas computacionales de simulación aplicadas. *Espacios*, 41 (29), 29.
- Mordor Intelligence Research & Advisory. (2023). "Tamaño del mercado de supercondensadores y análisis de participación: Tendencias de crecimiento y pronósticos (2024-2029)". Recuperado de <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/supercapacitors-market>
- Salanne, M. (2017). Ionic liquids for supercapacitor applications. *Topics in Current Chemistry*, 375 (2), 1–27.
- Stoller, M. D., Park, S., Zhu, Y., An, J., & Ruoff, R. S. (2008). Graphene-based ultracapacitors. *Nano Letters*, 8 (10), 3498-3502.
- Yang, Y., Han, Y., Jiang, W., Zhang, Y., Xu, Y., & Ahmed, A. M. (2022). Application of the supercapacitor for energy storage in China: Role and strategy. *Applied Sciences*, 12 (1), Article 354. <https://doi.org/10.3390/app12010354>
- Zhang, L. L., Zhao, X. S., & Stoller, M. D. (2020). Recent advances in carbon-based supercapacitors. *ChemSusChem*, 13 (6), 1520–1540. <https://doi.org/10.1002/cssc.201902509>

Recepción: 03.03.2026

Revisión: 31.03.2026

Publicación: 08.05.2026

<https://orcid.org/0009-0008-2310-6867>

<https://orcid.org/0000-0002-7565-9809>

PLAN MÉXICO: EL CAMINO HACIA LA SOBERANÍA EN SEMICONDUCTORES

PLAN MEXICO: THE PATH TOWARD SOVEREIGNTY IN SEMICONDUCTORS

(¹)Miguel Arturo Rodríguez Meza*,

(¹) Crisóforo Morales Ruíz

(1) Instituto de Ciencias, Centro de Investigaciones en Dispositivos Semiconductores, Ciudad Universitaria, Av. San Claudio y 14 Sur, Edif. IC5-IC6, C. P. 72570, Col. San Manuel, Puebla, México.

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP)

Correos

*rm224470622@alm.buap.mx

crisoforo.morales@correo.buap.mx

Resumen

La alta dependencia de México de semiconductores extranjeros se evidenció durante la crisis global de semiconductores iniciada en 2020. Ante este panorama, se reconoce la necesidad de reducir la dependencia externa y de orientar a México hacia la soberanía en semiconductores. Por este motivo, el gobierno mexicano incluyó en el Plan México una iniciativa destinada a impulsar el desarrollo de la industria semiconductora mexicana mediante etapas progresivas que incluyen la creación de centros de diseño y fábricas especializadas en el desarrollo de semiconductores. Gracias a este esfuerzo, México puede desarrollar innovaciones y crear tecnologías propias al contar con capacidades nacionales. Sin embargo, no suele ser muy claro para la población lo que son los semiconductores, sus propiedades y en qué dispositivos cotidianos están presentes. Por ello, resulta necesario promover su comprensión para lograr valorar su relevancia, ya que cotidianamente la sociedad actual depende profundamente de la tecnología basada en estos materiales.

Palabras clave: *semiconductores, crisis de semiconductores, Plan México, industria semiconductora.*

Abstract

The strong dependence of Mexico on foreign semiconductors was clearly shown due to the global semiconductor crisis begun in 2020. Given this scenario, it is recognized that it is necessary to diminish foreign dependence and guide Mexico toward sovereignty in semiconductors. Thus, the Mexican government put forward the Plan Mexico, aiming to foster the development of a Mexican semiconductor industry by creating design centers and factories specialized in semiconductor development. Owing to this effort, Mexico can develop innovations and generate its own technologies by relying on national capabilities. Nevertheless, it is often unclear to people what a semiconductor is, what its properties are, and in which devices they can be found. Therefore, it is necessary to promote their comprehension to assess their relevance, because modern society relies heavily on technologies based on these materials day by day.

Keywords: *semiconductors, global semiconductor crisis, Plan México, semiconductor industry.*

Introducción

Nadie imaginaría que los semiconductores transformarían al mundo hace más de 100 años. Ni siquiera aquellos que se percataron del interesante comportamiento de dichos materiales por primera vez, imaginaron el gran impacto que tendrían en la sociedad. Actualmente, los semiconductores están presentes casi en todo y en todas partes, desde los lugares más remotos de la Tierra hasta el espacio exterior. Presentes en un diminuto microchip hasta en un satélite orbitando la Tierra, logrando que la tecnología funcione eficientemente gracias a su capacidad para regular la energía eléctrica de forma inteligente (Mercado, 2016).

La historia de los semiconductores se remonta a finales del siglo XVIII cuando el italiano Alessandro Volta empleó el término por primera vez para describir aquellos materiales que no eran ni buenos conductores ni aislantes, basado etimológicamente en que el prefijo latín semi significa “medio” (Lukasiak, 2010).

Hoy en día la definición sigue la misma lógica, un semiconductor es un material cuya conductividad eléctrica se sitúa entre la de los metales y

la de los aislantes. Sin embargo, lo interesante es que su comportamiento no es fijo ya que dependiendo de las condiciones externas puede actuar como conductor o aislante, siendo esta propiedad lo que permite identificarlos (Mercado, 2016).

Es importante aclarar que muchas veces se habla de “semiconductores” como si fuera lo mismo que los chips o circuitos integrados. En realidad, los circuitos integrados están hechos de materiales semiconductores y representan sólo una de sus muchas aplicaciones.

Propiedades únicas de los semiconductores

Los semiconductores presentan propiedades particulares que los distinguen de los metales y aislantes (Figura 1). Las cuales fueron descubriéndose progresivamente a lo largo de la historia gracias a diversos experimentos, aunque durante ese periodo no se les consideraba una categoría especial de materiales, sino que eran considerados solamente como “conductores pobres” (Booyens, 1986).

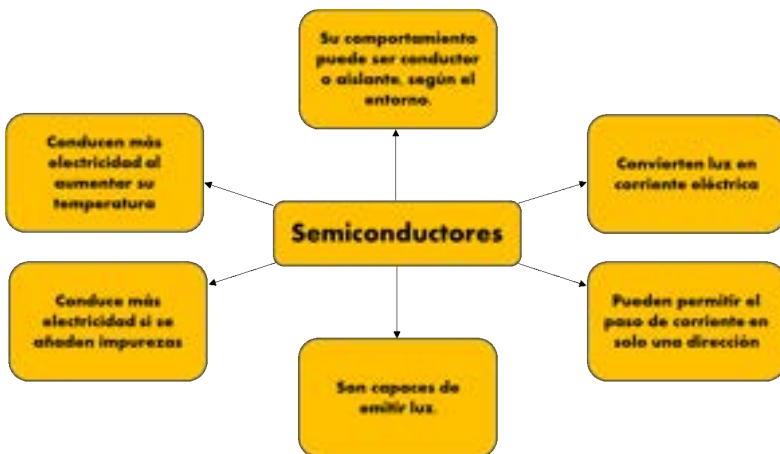


Figura 1. Propiedades que hacen especiales a los semiconductores (Elaboración propia).

El primer experimento que dio indicios de la existencia de las propiedades peculiares de los semiconductores fue en 1833 cuando el británico Michael Faraday se percató de que el sulfuro de plata tenía un comportamiento opuesto al de los metales: al calentarse dejaba pasar la corriente con más facilidad (Booyens, 1986). Otra propiedad fue descubierta en 1874 por el alemán Karl Braun cuando notó que ciertos compuestos de sulfuro permitían el paso de la corriente más fácilmente en un sentido que en el otro cuando se tocaban con una punta metálica. Fue una observación que indicaba nuevamente un comportamiento eléctrico especial (Lukasiak, 2010).

Así mismo, el estadounidense Charles Fritts en 1883 fabricó la primera celda solar utilizando selenio, la cual obtuvo una eficiencia por debajo del 1%. Sin embargo, marcó un hito al demostrar que existían materiales capaces de convertir luz solar en corriente eléctrica de forma directa. Actualmente se le considera el padre de las celdas solares fotovoltaicas. (Lukasiak, 2010).

Fue en 1907 cuando el británico Henry Round observó que cristales de carburo de silicio (SiC) eran capaces de emitir luz al hacer pasar una corriente eléctrica, evidenciando por primera vez que ciertos materiales semiconductores tienen la capacidad de producir luz (Schubert, 2012). Más adelante se observó que es posible modificar su comportamiento eléctrico al añadir ciertos elementos (impurezas) al semiconductor, lo cual ha permitido ajustar sus propiedades eléctricas para diversas aplicaciones. (Jiménez, 2023).

Semiconductores: invisibles pero esenciales

Las propiedades particulares de semiconductores se han aprovechado ampliamente para la creación de diversos dispositivos, siendo importante destacar que sin los semiconductores no sería posible la existencia de estos.

En particular, el primer dispositivo semiconductor funcional vio la luz a inicios del siglo XX, el cual era capaz de detectar ondas de radio. Gracias a lo anterior, fue posible el desarrollo de la tele-

grafía inalámbrica, que se consolidó como una de las primeras formas de comunicación sin la necesidad de utilizar cables. Además fue útil posteriormente para el desarrollo de la radio y los primeros sistemas de radar (Lukasiak, 2010).

Pero no fue hasta 1947 que inició el auge de los dispositivos semiconductores cuando William Shockley, John Bardeen y Walter Brattain fabricaron el primer transistor, un dispositivo que llegó para sustituir a los tubos de vacío. El transistor ofreció ventajas como reducción de tamaño, menor consumo de energía, menores costos y una mayor velocidad de operación (Heaven, 2019).

En la actualidad, el transistor se considera el dispositivo semiconductor más importante, ya que ha permitido la creación de tecnologías que hicieron posibles equipos como televisores, relojes, teléfonos móviles, computadoras, sistemas de navegación, sistemas de seguridad, sistemas de automatización, entre muchos otros (Rocha-Hoyos, 2020).

Otra aplicación ampliamente conocida de los semiconductores es la fabricación de chips o circuitos integrados. Estos son pequeños dispositivos que concentran millones de transistores y otros componentes electrónicos en una sola pieza, los cuales permiten procesar y almacenar información. Fabricados principalmente a partir de silicio, los chips son el corazón de la electrónica moderna y hacen posible el funcionamiento de prácticamente toda la tecnología que se usa a diario (Zhang, 2023).

El diodo es otro dispositivo semiconductor con gran relevancia, aunque es un componente pequeño y sencillo, el diodo está presente en muchas situaciones de la vida diaria ya que cumple una función esencial: determinar por dónde puede circular la electricidad. Gracias a él, la energía que llega puede transformarse en la corriente adecuada para que funcionen aparatos tan comunes como teléfonos móviles, computadoras, televisores o cargadores, módems de internet, así como las fuentes de energía de refrigeradores, lavadoras y hornos de microondas, entre otras muchas tecnologías (Rocha-Hoyos, 2020).

Las energías renovables han tomado amplia relevancia y los semiconductores también tienen su aportación al campo debido a la propiedad de convertir luz en energía eléctrica aprovechable. Debido a esto ha sido posible la creación de celdas solares con el objetivo de tener energías que no contaminen. Actualmente se investiga arduamente para lograr una mejor eficiencia de las celdas solares a través del estudio de nuevos materiales para poder en un futuro implementarlas ampliamente y migrar más hacia energías limpias (Noman, 2024).

Los semiconductores también se encuentran en los LEDs, dispositivos que emiten luz al recibir electricidad. Gracias a su forma más eficiente de transformar electricidad en luz, han sustituido a las bombillas incandescentes tradicionales, ya que consumen menos energía para producir la misma cantidad de luz. Además, su larga vida útil reduce la necesidad de reemplazos frecuentes, lo que los convierte en una opción más económica frente a otras tecnologías de iluminación, como se muestra en la figura 2 (Gayral, 2017).

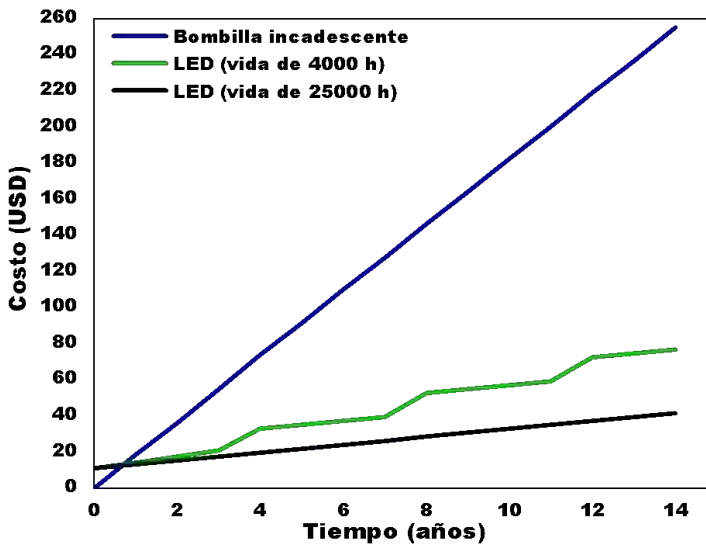


Figura 2. Comparación del costo total en dólares de un sistema de iluminación doméstico utilizado por 3 horas al día donde se muestra que el costo de una bombilla incandescente es mucho mayor al de diferentes tipos de LEDs (Imagen modificada de Gayral, 2017).

Los semiconductores también están presentes en muchos tipos de sensores como los de gas, presión, luz, sonido, temperatura, imagen, movimiento o ubicación (Luo et al, 2023).

Por ejemplo, los sensores de gas utilizan óxidos metálicos semiconductores, los cuales cambian su comportamiento eléctrico al interactuar con distintos gases, lo que hace posible identificar-

los y medirlos. De igual forma existen sensores de gases que utilizan polímeros semiconductores o nanotubos de carbono (Nikolav, 2020). El campo médico también se ve beneficiado por los semiconductores, ya que permiten una mejor precisión y funcionalidad en el diagnóstico debido al desarrollo de escáneres de resonancia magnética, equipos de ultrasonido y sensores portátiles de monitoreo (Jiménez, 2023).



Figura 3. Los materiales semiconductores son la columna vertebral de la tecnología moderna al estar presentes en un sinnúmero de aplicaciones así como dispositivos (Elaboración propia).

Así mismo, las tecnologías emergentes como la inteligencia artificial y la computación cuántica son posibles gracias a los semiconductores, ya que estas requieren dispositivos semiconductores más rápidos y eficientes para su procesamiento y almacenamiento (Jiménez, 2023).

En definitiva, no podemos negar que los semiconductores son la columna vertebral de la tecnología moderna (Figura 3): desde los dispositivos electrónicos que usamos cotidianamente al contener componentes electrónicos (como diodos, resistencias, capacitores, relés, transistores) hasta los dispositivos en desarrollo para las tecnologías emergentes, por lo que son indispensables para el progreso tecnológico.

México y su aporte al mundo de los semiconductores

México inició en la industria de los semiconductores en 1968 gracias a la llegada al país de las empresas “Mexican Burroughs y Motorola de México”. Posteriormente, con General Instrument e International Business Machines (IBM), las cuales estaban enfocadas en la manufactura de diodos y transistores individuales así como en el ensamble de dispositivos electrónicos para mercados internacionales. Después de los 90’s la industria semiconductora evolucionó a la manufactura final de computadoras, televisores y equipos de telecomunicaciones.

Hoy en día, se han instalado diversas compañías en diferentes estados, como se muestra en la figura 4, las cuales han llevado a México a especializarse en el ensamblado y pruebas finales (León-Puertos, 2025). Sin embargo, aunque el país cuenta con una amplia cantidad de empresas, todavía no es autosuficiente en el proceso completo de producción que cualquier semiconductor necesita, pues no cubre todas las fases de la cadena de valor (Figura 5), en particular el diseño y la fabricación (Martínez-Gómez, 2022).

Según Milken Institute, México posee una participación limitada respecto al diseño y los circuitos integrados que se utilizan se fabrican en el extranjero debido a que se cuenta con los equipos necesarios de producir obleas de materiales semiconductores ni de la impresión de circuitos sobre ellas (Milken Institute, 2023)

Por ello, la dependencia del extranjero resulta notoria y se evidenció en la primera gran crisis de semiconductores del siglo XXI, la cual inició a partir de la pandemia de COVID-19 cuando Taiwán, fabricante mundial mayoritario de chips, no pudo satisfacer la demanda mundial ocasionada por el crecimiento exponencial en el uso de tecnologías de la información y comunicación, como computadoras, teléfonos móviles, módems de internet y otros dispositivos electrónicos. Lo que, en consecuencia, provocó desabasto y retrasos en la entrega de componentes a nivel mundial.

A esta situación se sumó, a inicios de 2022, el conflicto bélico entre Ucrania y Rusia, que interrumpió la producción de ciertos insumos químicos

necesarios para la fabricación de chips. Como consecuencia, la escasez y los costos de chips aumentaron (Martínez-Gómez, 2022).



Figura 4. Empresas relacionadas con semiconductores en México (Imagen modificada de León-Puertos et al., 2025).

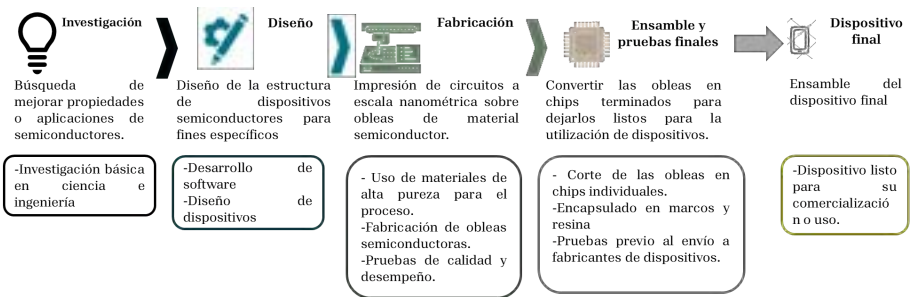


Figura 4. Empresas relacionadas con semiconductores en México (Imagen modificada de León-Puertos et al., 2025).

Plan México: estrategia tecnológica en semiconductores

La escasez mundial de chips evidenció la desventaja de depender de lo que otros países producen. Por ejemplo, en México, se estima que en 2023 las importaciones de semiconductores superaron los 24 mil millones de dólares, lo cual demuestra la urgencia de reducir la dependencia extranjera y de impulsar la producción nacional independiente de semiconductores. De lo contrario, el país corre el riesgo de enfrentar nuevamente los efectos de otra crisis de semiconductores.

Por lo que el gobierno actual encabezado por la Dra. Claudia Sheinbaum Pardo presentó el Plan México con el fin de impulsar el desarrollo de toda la cadena de valor de semiconductores en el país con la meta de alcanzar la soberanía tecnológica y así no depender de importaciones extranjeras. Dicha estrategia es de interés debido a la generación de números de empleos, el beneficio directo a industrias como la de telecomunicaciones, electrodomésticos, automotriz y médico, entre muchas otros.

Asimismo, el surgimiento de nuevas tecnologías, como el vehículo eléctrico mexicano Olinia, ilustra la aplicación de esta estrategia.

El Plan México contempla tres etapas (Presidencia de la República, 2025), como se muestra en la Figura 6.

a) La primera etapa se contempla de 2025 a 2027 y busca la creación de centros de diseño de semiconductores llamados “Kutsari” (“arena” en purépecha) ubicados en Puebla, Jalisco y Sonora. En estos centros se proyecta el desarrollo de nuevos diseños de semiconductores en colaboración con instituciones académicas y la industria. Asimismo, se busca que se lleve a cabo el registro de las innovaciones realizadas mediante patentes para su posterior comercialización. Lo cual resulta relevante porque impulsa la innovación nacional y fortalece la independencia tecnológica mediante diseños y patentes mexicanas.

b) La segunda etapa se contempla de 2026 a 2029 con la instalación de una fábrica de semiconductores con infraestructura para principalmente producir a gran escala chips tradicionales basándose en los diseños mexicanos desarrollados en los centros Kutsari con el fin de cubrir la



Figura 6. Plan México para garantizar los tres eslabones de la cadena de valor de semiconductores (Elaboración propia).

demanda nacional, fortaleciendo así la soberanía tecnológica y garantizando la demanda nacional. Cabe resaltar que hasta ahora no se ha hablado sobre la producción en México de obleas de silicio (láminas circulares que sirven como base para fabricar los chips) .

c) La tercera etapa, prevista entre 2029 y 2030, se destina a la creación de una industria pública especializada en el ensamble,

pruebas y empaquetamiento de chips mexicanos para asegurar su uso confiable y competitivo en aplicaciones tecnológicas.

Con lo anterior se garantiza el aporte de México a los tres eslabones de la cadena de valor de semiconductores: diseño, fabricación y ensamble, contribuyendo a disminuir la dependencia tecnológica del extranjero y a fortalecer la soberanía tecnológica nacional (SECIHTI, 2025).

Conclusiones

Aunque pocas veces se reconoce, los semiconductores son el pilar de la vida moderna gracias a sus propiedades. Sin ellos no sería posible la existencia de la basta cantidad de dispositivos de uso cotidiano ni el desarrollo de las tecnologías emergentes. Por lo que ante la posibilidad del surgimiento de otra crisis de semiconductores, es fundamental que México esté preparado para evitar impactos negativos en el ámbito social, económico y tecnológico. Para mitigar la problemática anterior, el gobierno

presentó la propuesta del Plan México, iniciativa que busca el desarrollo de toda la cadena de valor de semiconductores para asegurar el abasto de la demanda nacional sin dependencia extranjera. Gracias a este plan, también se impulsa el desarrollo de nuevas tecnologías, como la propuesta del primer vehículo eléctrico mexicano.

Aunque el esfuerzo del gobierno con el Plan México aún está en sus primeros pasos, las bases para avanzar hacia el futuro ya han sido establecidas.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del escrito, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Descargo de Responsabilidad (Inteligencia Artificial) Los autores declaran por la presente que NO se han utilizado tecnologías de IA generativa, tales como modelos de lenguaje grandes (ChatGPT, COPILOT, etc.) y generadores de texto a imagen, durante la redacción o edición de este manuscrito.

Agradecimientos

MM agradece a los docentes y asesores por el apoyo brindado durante la formación académica, así como al SECIHTI por el apoyo otorgado para la realización de los estudios de maestría.

Referencias

- Booyens, H. (1986). Semiconductors—Past, present and future. In *Proceedings of the First International Symposium* (pp. 61–71). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-033454-7.50009-7>
- Gayral, B. (2017). LEDs for lighting: Basic physics and prospects for energy savings. *Comptes Rendus Physique*, 18 (9-10), 453 - 461. doi:10.1016/j.crhy.2017.09.001
- Heaven, D. (2019) The humble mineral that transformed the world. BCC. <https://www.bbc.com/future/ bespoke/made-on-earth/how-the-chip-changed-everything/>
- Jiménez, A. (2023). Semiconductores: ¿Qué son y por qué son importantes? *Cuadernos Fronterizos*, 19(59), 22–24. <https://doi.org/10.20983/cuadfront.2023.59.6>
- León Puertos, C., López Valle, I. J., Reyes Chacón, D. A., Garibay Bagnis, C., & Rivera Anaya, M. (2025). The semiconductor industry and its economic, political, and social impact in Mexico. *International Journal of Environmental Sciences*, 12(1), 45-60
- Lukasiak, L. & Jakubowski, A. (2010). History of Semiconductors. *Journal of Telecommunications and Information Technology*, 39(1), 3–9. <https://doi.org/10.26636/jtit.2010.1.1015>
- Luo, Y., Abidian, M. R., Ahn, J. H., Akinwande, D., Andrews, A. M., Antonietti, M., Bao, Z., Berggren, M., Berkey, C. A., Bettinger, C. J., Chen, J., Chen, P., Cheng, W., Cheng, X., Choi, S.-J., Chortos, A., Dagdeviren, C., Dauskardt, R. H. & Chen, X. (2023). Technology Roadmap for Flexible Sensors. *ACS Nano*, 17(6), 5211–5295. <https://doi.org/10.1021/acsnano.2c12606>
- Martínez Gómez, C. I., & Sánchez Gaspariano, L. A. (2023). La primer gran crisis de semiconductores del siglo XXI. *RD-ICUAP*, 8(24), 37–44. <https://doi.org/10.32399/icuap.rdic.2448-5829.2022.24.1076>
- Mercado-Mercado, A., Martínez-Facio, M., Favila-Flores, F., & García-Moya, A. (2016). Historia y evolución de la industria de semiconductores y la integración de México en el sector. *European Scientific Journal* (ESJ), 12(18), 65–78. <https://doi.org/10.19044/esj.2016.v12n18p65>
- Milken Institute. (2023). Strengthening US–Mexico semiconductor supply chains: Opportunities and challenges in the nearshoring agenda (Informe). <https://milkeninstitute.org/sites/default/files/2023-06StrengtheningUSMexicoSemiconductorSupplyChainsOpportunitiesandChallengesintheNearshoringAgenda230607.pdf>
- Nikolic, M. V., Milovanovic, V., Vasiljevic, Z. Z., & Stamenkovic, Z. (2020). Semiconductor gas sensors: Materials, technology, design, and application. *Sensors*, 20(22), 6694. <https://doi.org/10.3390/s20226694>
- Noman, M., Khan, Z., & Jan, S. T. (2024). A comprehensive review on the advancements and challenges in perovskite solar cell technology. *RSC Advances*, 14, 5085–5131. <https://doi.org/10.1039/D3RA07518D>
- Presidencia de la República. (2025). Presidenta Claudia Sheinbaum anuncia creación del Centro Nacional de Diseño de Semiconductores “Kutsari”. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/presidencia/prensa/presidenta-claudia-sheinbaum-anuncia-creacion-del-centro-nacional-de-diseno-de-semiconductores-kutsari>
- Rocha Hoyos, J. C (2020). Semiconductores: Conceptos y aplicaciones: Una revisión bibliográfica. *Revista*

Multidisciplinar, 2(3), 12-26. <https://revista.estudioidea.org/ojs/index.php/mj/article/view/118>

Schubert, E. F. (2012). History of light-emitting diodes. En *Light-Emitting Diodes* (pp. 1–26). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511790546.002>

Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación. (2025). Centro de diseño "Kutsari" fortalecerá la cadena de valor de semiconductores en el país: Secihti. SECIHTI. <https://secihti.mx/sala-de-prensa/centro-de-diseno-kutsari-fortalecera-la-cadena-de-valor-de-semiconductores-en-el-pais-secihti/>

Zhang, Z., Zhang, H., Jing, Z. & Liu, X. (2023). Evolution of Silicon Integrated Circuit: from Scaling to Lowering Power Consumption. *Applied and Computational Engineering*, 3, 231-239. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/3/20230422>

Recepción: 18.02.2026

Revisión: 31.03.2026

Publicación: 08.05.2026

<https://orcid.org/0000-0003-0527-5815>

<https://orcid.org/0000-0003-1541-1454>

<https://orcid.org/0000-0001-6660-469X>

<https://orcid.org/0000-0003-3090-7933>

REDES NEURONALES ARTIFICIALES: MODELADO, ENTRENAMIENTO Y VALIDACIÓN

ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS: MODELING, TRAINING, AND VALIDATION.

Verónica Santacruz Vázquez
Guadalupe Cuahuizo Huitzil
Claudia Santacruz Vázquez
Santa Toxqui López

Facultad de Ingeniería Química
Av. San Claudio y 18 Sur,
Col. Jardines de San Manuel, CP 72570
Puebla, Pue., México
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP)

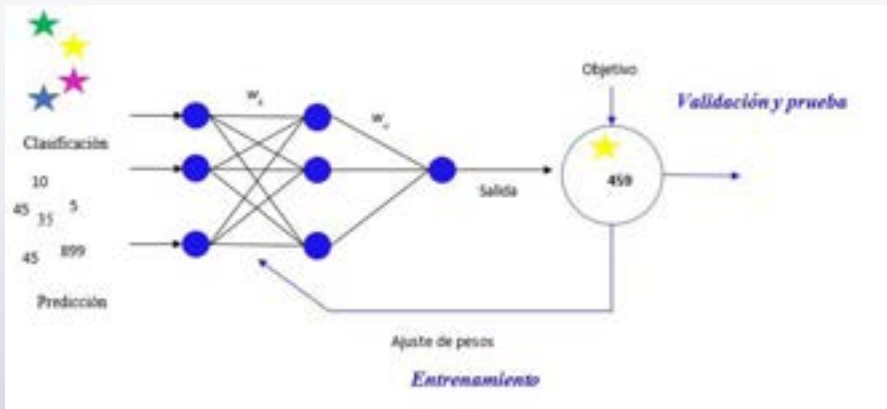
Correos:
veronica.santacruz@correo.buap.mx
guadalupe.cuahuizo@alumno.buap.mx
claudia.santacruz@correo.buap.mx
santa.toxqui@correo.buap.mx

Resumen

El documento aborda de manera integral el concepto, funcionamiento y aplicación de las Redes Neuronales Artificiales (RNA), destacándose como una herramienta fundamental de la inteligencia artificial inspirada en el sistema nervioso biológico. Las RNA tienen la capacidad de aprender a partir de datos, reconocer patrones complejos y apoyar la toma de decisiones, lo que ha impulsado su uso en diversos sectores. Se describen sus principales aplicaciones en áreas como salud y biotecnología, industria y automatización, alimentos y biotecnología alimentaria, tecnologías de la información, finanzas y educación, resaltando su utilidad en diagnóstico, predicción, optimización de procesos y análisis de grandes volúmenes de datos.

El documento explica cómo funciona un RNA, detallando el modelo de neurona artificial basado en entradas, pesos sinápticos, suma ponderada y funciones de activación. Asimismo, se presentan los tipos de aprendizaje automático: supervisado, no supervisado y por refuerzo, señalando sus características, ventajas y limitaciones. Como conclusión, se enfatiza que las RNA son sistemas de procesamiento de información altamente versátiles, cuya principal fortaleza es su capacidad de aprendizaje a partir de datos mediante el ajuste de sus conexiones internas.

Palabras clave: Redes neuronales artificiales, entrenamiento, validación, prueba.



Abstract

The document comprehensively addresses the concept, functioning, and application of Artificial Neural Networks (ANNs), highlighting them as a fundamental tool of artificial intelligence inspired by the biological nervous system. ANNs have the ability to learn from data, recognize complex patterns, and support decision-making, which has driven their use across various sectors. Their main applications are described in areas such as health and biotechnology, industry and automation, food and food biotechnology, information technologies, finance, and education, emphasizing their usefulness in diagnosis, prediction, process optimization, and the analysis of large volumes of data. The document explains how an ANN works, detailing the artificial neuron model based on inputs, synaptic weights, weighted summation, and activation functions. Likewise, the types of machine learning—supervised, unsupervised, and reinforcement learning—are presented, outlining their characteristics, advantages, and limitations. In conclusion, it is emphasized that ANNs are highly versatile information-processing systems whose main strength lies in their ability to learn from data through the adjustment of their internal connections.

Keywords: Artificial neural networks, training, validation, testing.

Introducción

El interés por las redes neuronales artificiales (RNA) entre los jóvenes estudiantes ha crecido de manera notable en los últimos años, impulsado principalmente por el avance acelerado de la inteligencia artificial y su presencia en la vida cotidiana. Este interés se manifiesta tanto en el ámbito académico como en el personal y profesional.

En primer lugar, las RNA resultan atractivas para los estudiantes porque permiten comprender y desarrollar tecnologías actuales como los asistentes virtuales, los sistemas de recomendación, el reconocimiento de imágenes y voz, y las aplicaciones de aprendizaje automático. Al observar que estas herramientas están integradas en plataformas digitales, redes sociales y dispositivos inteligentes, los jóvenes perciben su estudio como útil, actual y con impacto real. Asimismo, el aprendizaje de RNA fomenta el desarrollo del pensamiento lógico, la resolución de problemas, el análisis de datos y la creatividad. Para muchos estudiantes, trabajar con modelos de inteligencia artificial representa un reto intelectual estimulante que combina matemáticas, programación y ciencias aplicadas, lo cual incrementa su motivación y participación. Otro factor importante es la alta demanda laboral asociada a áreas como la ciencia de datos, la inteligencia artificial y la ingeniería en sistemas. Los jóvenes reconocen que el dominio de conceptos relacionados con RNA puede mejorar sus oportunidades

profesionales, lo que refuerza su interés por aprender sobre estas tecnologías desde etapas tempranas de su formación.

La incorporación de metodologías activas en el aula, como proyectos prácticos, simulaciones y uso de *software* especializado, ha contribuido a que las RNA sean percibidas como un tema accesible y atractivo, incluso para estudiantes sin una formación técnica avanzada.

¿Qué son las redes neuronales artificiales?

Las *redes neuronales artificiales* (RNA) son una herramienta clave de la *inteligencia artificial*, impulsando la innovación tecnológica y mejorando la eficiencia en distintos sectores. Su capacidad para aprender y adaptarse las convierte en un pilar fundamental del desarrollo tecnológico actual y futuro. Las RNA son un *modelo computacional* inspirado en la estructura y el funcionamiento del *sistema nervioso biológico*, específicamente en la manera en que las neuronas en el cerebro humano procesan información. Estas redes han demostrado ser especialmente eficientes en tareas de *reconocimiento de patrones*, *aprendizaje automático* y toma de decisiones (Krogh, 2008). Las RNA simulan el mecanismo de aprendizaje de las neuronas biológicas del cerebro humano. Mismas que están conectadas entre sí mediante axones y dendritas, y la región de conexión entre estos dos componentes se denomina sinapsis (Figura 1a (Aggarwall et al., 2018)).

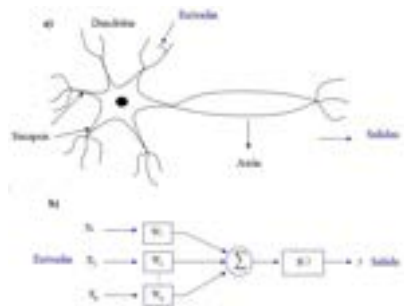


Figura 1. a) Neurona biológica b) Neurona artificial.

El uso de las RNA en la tecnología ha transformado de manera significativa múltiples sectores, ya que permiten a las máquinas aprender de los datos, reconocer patrones complejos y tomar

decisiones de forma similar al cerebro humano. En la Tabla 1, se describen sus principales aplicaciones:

Tabla 1. Aplicaciones de las RNA.

Área	Usos y aplicaciones
Salud y biotecnología (Wu et al., 2018)	Diagnóstico médico mediante análisis de imágenes (rayos X, resonancias, tomografías). Predicción de enfermedades y apoyo a la medicina personalizada. Desarrollo de fármacos y análisis de datos genómicos.
Industria y automatización (Petrova et al., 2021)	Control de procesos industriales y mantenimiento predictivo. Optimización de la producción y reducción de errores. Robots inteligentes capaces de adaptarse a su entorno.
Alimentos y biotecnología alimentaria (Huang et al., 2007)	Control de calidad y detección de defectos. Optimización de formulaciones y procesos productivos. Análisis de propiedades fisicoquímicas y sensoriales.
Tecnología de la información y comunicación (Wu et al., 2018)	Reconocimiento de voz e imagen (asistentes virtuales, reconocimiento facial). Traducción automática y procesamiento del lenguaje natural. Sistemas de recomendación en plataformas digitales
Finanzas y comercio (Pallathadka et al., 2023)	Detección de fraudes y análisis de riesgos. Predicción de mercados y comportamiento del consumidor. Automatización de servicios financieros.
Educación e investigación (Dharmasaroja et al., 2016)	Sistemas de aprendizaje personalizado. Análisis de grandes volúmenes de datos científicos. Simulación y modelado de fenómenos complejos.

¿Cómo funciona una RNA?

Una red neuronal artificial (RNA) funciona como un sistema de capas interconectadas que procesan información y aprende ajustando sus conexiones internas (pesos) a partir de datos. Durante el proceso de aprendizaje en

una *neurona artificial*, las *sinapsis* se modelan mediante un peso, de manera que cada entrada ($X_1, X_2 \dots X_m$) se multiplica por su peso ($Wk_1, Wk_2 \dots Wkm$) antes de ser enviada a la *neurona artificial* (Figura 2).

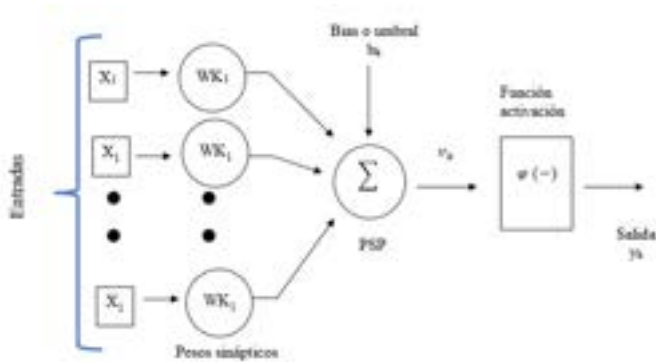


Figura 2. Neurona artificial (Adaptado de Gupta, 2013).

Aquí, las señales ponderadas se suman para proporcionar la entrada, luego se calcula una *función de activación*, que puede ser: *función escalonada*, *tangente hiperbólica*, *sigmoidea*, etc. Y finalmente se devuelve un valor como salida (Hajian & Styles, 2018, Gurney, 2018).

Entre las diferentes propiedades de las *RNA*, se encuentra la propiedad para “*aprender*” a partir de su entorno por medio de un *proceso iterativo* que le permite ajustar los *pesos sinápticos* y los *umbrales* aplicados a la red (Alarcón, 2008). El *aprendizaje automático* es una rama de la *inteligencia artificial* que permite a los sistemas aprender a partir de datos y mejorar su desempeño sin ser programados explícitamente. Dentro de este campo se distinguen distintos enfoques, entre los que destacan el *aprendizaje supervisado* y el *aprendizaje no supervisado* (Amrutha & Ajai, 2018).

El *aprendizaje automático supervisado* utiliza datos previamente etiquetados, donde cada entrada tiene asociada una salida conocida. El modelo aprende comparando sus resultados con los valores reales y ajusta sus parámetros para minimizar el error, por lo que se emplea principalmente en tareas de clasificación y predicción (Di Franco & Santurro, 2021). El *aprendizaje supervisado* se utiliza en una variedad de aplicaciones, como clasificación, regresión y *reconocimiento de patrones*, y es eficaz cuando se dispone de un conjunto de datos etiquetado. Este modelo puede proporcionar información precisa sobre la relación entre las entradas y las salidas esperadas (Haykin, 2009).

Por su parte, el *aprendizaje automático no supervisado* trabaja con datos no etiquetados. En este caso, el modelo identifica patrones, agrupamientos o relaciones entre los datos, sin contar con una referencia previa. En este *algoritmo* se proporciona como entrada a la *RNA*, una gran cantidad de datos y características de cada observación, para que la red genere los datos de salida. Generalmente se emplea el *aprendizaje no supervisado* para clasificar y diferenciar imágenes en función de algunas características

como el color, tamaño, forma, para la clasificación y separación en grupos de los datos (Dike et al., 2018).

Y finalmente el *Aprendizaje por refuerzo*, en esta técnica se considera una variación de las técnicas de aprendizaje supervisado, cuyo proceso de aprendizaje se realiza mediante prueba y error, generando una respuesta satisfactoria o insatisfactoria por parte de la *RNA* para cada entrada. Si es satisfactorio, los pesos y *umbrales sinápticos* se incrementan gradualmente para reforzar (recompensar) esta condición de comportamiento involucrada con el sistema (Da Silva et al., 2017).

Funciones de activación

Durante el *proceso de aprendizaje* se aplican las *funciones de activación* que se definen como *ecuaciones matemáticas* que procesan los datos alimentados a la *neurona*.

Algunas *funciones de activación* comunes utilizadas en *redes neuronales* son la *función Sigmoidea*, *función Tangente Hiperbólica (tanh)*, *Rectified Linear Unit (ReLU)*, *Leaky rectified linear Unit (Leaky ReLU)*, entre otras (Liew et al., 2016). La elección de la *función de activación* depende del tipo de problema que se está abordando y puede requerir *experimentación* para determinar cuál funciona mejor para cada caso específico. Las *funciones de activación* se pueden clasificar en:

Funciones de activación discretas - La salida de la neurona solo puede tomar un conjunto finito de valores. Normalmente, se utilizan dos valores 0 o 1, por lo que se consideran *neuronas binarias*, este tipo de *funciones de activación discretas* facilitan y reducen la complejidad de las implementaciones de *redes neuronales* en *hardware* (Plagianakos et al., 2001).

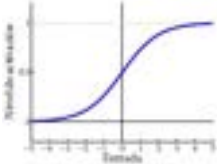
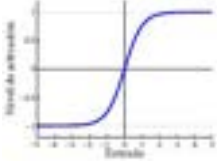
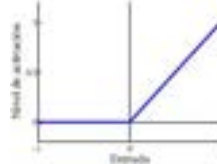
Funciones de activación continuas - La salida de la neurona puede tomar cualquier valor dentro de un intervalo. Generalmente, el rango de ese intervalo está limitado, $[0, 1]$ o bien al *intervalo* $[-1, 1]$ (Berzal, 2018).

La *función de activación* juega un papel importante en el entrenamiento de *redes neuronales*, ya que proporciona la *no linealidad* necesaria del modelo para poder aprender *relaciones complejas* entre los *datos de entrada y salida* (Rasamoelina et al., 2020). Dentro de las *fun-*

ciones de activación continuas se pueden utilizar *funciones de activación lineales* (*función identidad*) como *funciones no lineales*. En la Tabla 2, se presentan algunas de las funciones de activación más empleadas en la construcción de las *RNA*.

Tabla 2. Tipos de funciones de activación (Liew et al., 2016).

	Función Activación	Rango	Gráfica
Lineal	$y = \text{sgn}(x)$	$[-\infty, +\infty]$	
Función umbral	$y = u(x)$	$\begin{cases} 1 & \text{si } z \geq 0 \\ 0 & \text{si } z < 0 \end{cases}$	
Función signo	$y = \text{sgn}(x)$	$\begin{cases} 1 & \text{si } z \geq 0 \\ -1 & \text{si } z < 0 \end{cases}$	
Saturación binario	$y = \begin{cases} 1 & \text{si } z > 1 \\ z & \text{si } 0 \leq z \leq 1 \\ 0 & \text{si } z < 0 \end{cases}$	$[0, +1]$	
Saturación simétrica	$y = \begin{cases} 1 & \text{si } z > 1 \\ z & \text{si } -1 \leq z \leq 1 \\ -1 & \text{si } z < -1 \end{cases}$	$[-1, +1]$	

Sigmoidal	$y = \frac{1}{1 + e^{-x}}$	$[0, +1]$	
Tangente hiperbólica	$y = \tanh \cosh (x)$ $y = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$	$[-1, +1]$	
Función lineal rectificadora	$y = f_{\text{retn}}(x)$	$\begin{cases} x & \text{si } x \leq 0 \\ 0 & \text{si } x < 0 \end{cases}$	

Arquitectura de las RNA

La estructura básica de un *RNA* puede expresarse como *Capa de Entrada* - *Capas Ocultas* - *Capa de Salida*. Cada conexión entre *nod*os tiene un peso asociado que se ajusta durante el *entrenamiento* de la red para aprender la representación y la relación entre las entradas y las salidas (Essa et al., 2020, Al-Shathr et al., 2021, Asha et al., 2021). Las capas de una *red multicapa* se dividen en dos categorías: *capas visibles* y *capas ocultas*;

las *capas visibles* son la de entrada y de salida de la *red neuronal*. Todas las capas intermedias diferentes a las *capas de entrada* y de *salida* reciben el nombre de *capas ocultas* (Figura 3). El número de *capas ocultas* y su respectivo número de *neuronas* dependen de la naturaleza y complejidad del problema que está mapeando la red, así como de la cantidad y calidad de los datos disponibles sobre el problema (Da Silva et al., 2017).

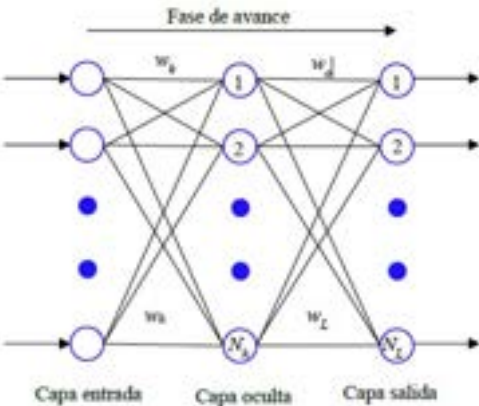


Figura 3. Red neuronal feed forward (Hemeida et al., 2020).

Clasificación por su conexión

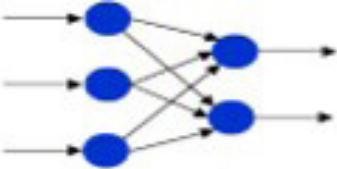
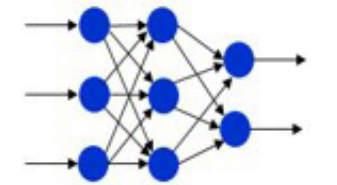
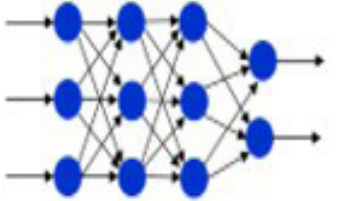
La configuración de una *RNA* se refiere a su estructura y diseño, incluyendo la disposición de las capas, el número de *neuronas* en cada capa, la conexión entre ellas y otros aspectos específicos. Las *RNA* se pueden clasificar según su conexión en; *función de base radial*, *redes recurrentes*, *feed forward*, y otras (Hemeida et al., 2020).

Redes neuronales de función base radial. - Se consideran una forma especial de *redes neuronales multicapa* que contienen solo una *capa oculta* con *funciones de activación* basadas en *Gauss*, se han aplicado en la clasificación de fallas de procesos, control no lineal y pronósticos de series de tiempo (Aljarah et al., 2018).

Redes recurrentes. - Las conexiones entre las *neuronas* forman ciclos, permitiendo que la información se *retroalimente* en la red (Salinas et al., 2020).

Finalmente, las *redes neuronales feedforward* se componen: una *capa de entrada*, *capas ocultas* y una *capa de salida*. Las distintas capas se conectan entre sí de tal forma que la salida de la capa *i* se utiliza como entrada en la capa *i + 1*. Las salidas de las *neuronas* en la *capa de salida* representan la salida de la red (Hemeida et al., 2020). En una *red neuronal* de tipo *feed-forward*, podemos encontrar varias arquitecturas, dependiendo del número de *capas ocultas* que se utilicen; ver Tabla 3

Tabla 3. Configuraciones de redes neuronales (Da Silva et al., 2017).

Tipo	Características	Características
Redes simples o unicapa	Las neuronas de la capa de entrada, se limitan a recibir las señales de entrada provenientes del exterior, redistribuyen esas entradas a las neuronas de la capa de salida.	
Redes multicapa, con una capa oculta	Si se añaden nuevas capas intermedias, estas capas ya no serán visibles desde el exterior, lo que obligará a utilizar algoritmos como backpropagation para ajustar sus parámetros internos.	
Redes profundas, con varias capas ocultas	Las capas ocultas le permiten a la red neuronal construir un modelo interno de la forma en que los patrones de datos de entrada están relacionados con las salidas deseadas.	

El desempeño de la *RNA* se ve afectado por la *función de transferencia* y la configuración (Hemeida et al., 2020). Sin embargo, no es posible deter-

minar teóricamente cuántas capas o *neuronas ocultas* se necesitan para cada problema (Benardos & Vosniakos, 2007; Rezakazemi et al., 2011).

Etapas para construir un modelo RNA

Para la construcción de una RNA se consideran los procesos de *entrenamiento*, validación y prueba. El proceso de *entrenamiento* consiste en elegir un *modelo* que permita aprender patrones y relaciones a partir de los datos de entrada, donde los pesos del modelo se ajustan iterativamente mediante la *retropropagación* y el *descenso del gradiente* para minimizar la *función de costo* en este conjunto (Haykin, 2009).

El proceso de validación se utiliza para decidir cuándo detener el *entrenamiento* y con ello evitar el *sobreajuste* y finalmente el proceso de prueba permite evaluar la capacidad predictiva y proporcionar una estimación objetiva de cómo el *modelo* generaliza a datos no vistos y no utilizados en el proceso de *entrenamiento* (Dayhoff et al., 2001).

Inicialmente los datos de entrada se dividen en tres conjuntos distintos para realizar los procesos de *entrenamiento*, validación y prueba. Es necesario asegurarse que el valor máximo y el valor mínimo de cada variable de entrada se

encuentren presente en el conjunto de *entrenamiento*, de lo contrario, si dichos valores se asignan en el conjunto de prueba, la *red de perceptrón multicapa (MLP)* podría generar errores significativos (Zhang et al., 1999). Khatti et al. (2019) propusieron una división aleatoria de los datos experimentales en una proporción de 70, 15 y 15% para los tres conjuntos, mientras que Kalantary et al. (2019) propusieron una división aleatoria de 60, 20 y 20% para el conjunto de *entrenamiento*, validación y prueba respectivamente. Por otro lado, Solis-Rios et al. (2023) propone una división 75, 15 y 10 para los conjuntos de *entrenamiento*, validación y prueba respectivamente.

Profundizando sobre el proceso de *entrenamiento* de una red, este consta de varias etapas, la primera es el ajuste de los *pesos sinápticos* de la *capa de salida*, seguido del ajuste de los *pesos sinápticos* de las *capas intermedias* y finalmente el ajuste de los *pesos sinápticos* de la primera *capa oculta*, los cuales se describen en seguida.

Parte I: ajuste de los pesos sinápticos de la capa de salida.

La *función de error cuadrático medio* de la ecuación 1. se emplea para medir el desempeño asociado con los resultados producidos por las *neuronas* de salida con respecto a la muestra dada, es decir:

$$E(k) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_3} (d_j(k) - Y_j^{(3)}(k))^2 \quad \text{ec. 1.}$$

Donde $Y_j^{(3)}(k)$ es el valor producido por la j -ésima *neurona* de salida de la red para la k -ésima *muestra de entrenamiento*, mientras que $d_j(k)$ es el valor deseado.

El objetivo del proceso de *entrenamiento* de la *capa neuronal de salida* consiste en ajustar la matriz de peso $W_{ji}^{(3)}$ para minimizar el error entre las salidas producidas por la red con respecto a las salidas deseadas.

$$\frac{\partial E^{(3)}}{\partial W_{ji}^{(3)}} = \frac{\partial E}{\partial Y_j^{(3)}} \cdot \frac{\partial Y_j^{(3)}}{\partial W_{ji}^{(3)}} \quad \text{ec. 2}$$

$$\frac{\partial E^{(3)}}{\partial W_{ji}^{(3)}} = Y_i^{(2)} \quad \text{ec. 3} \quad \frac{\partial Y_j^{(3)}}{\partial I_j^{(3)}} = g'(I_j^{(3)}) \quad \text{ec. 4} \quad \frac{\partial E}{\partial Y_j^{(3)}} = -(d_j - Y_j^{(3)}) \quad \text{ec. 5}$$

Dónde $g'(\cdot)$ denota la *derivada* de primer orden de la *función de activación* empleada. Reemplazando (3), (4) y (5) en (2), obtenemos ecuación 6:

$$\frac{\partial E}{\partial W_{ji}^{(3)}} = -(d_j - Y_j^{(3)}) \cdot g'(I_j^{(3)}) \cdot Y_i^{(2)} \quad \text{ec. 6}$$

El ajuste de la *matriz de pesos* $W_{ji}^{(3)}$ debe realizarse en la dirección opuesta al gradiente para minimizar el error, como lo muestra la ecuación 7:

$$\Delta W_{ji}^{(3)} = -\eta \cdot \frac{\partial E}{\partial W_{ji}^{(3)}} \Rightarrow \Delta W_{ji}^{(3)} = \eta (d_j - Y_j^{(3)}) \cdot g'(I_j^{(3)}) \cdot Y_i^{(2)} \quad \text{ec. 7}$$

Donde η es la *tasa de aprendizaje* del *algoritmo de retropropagación*.

Parte II: Ajuste de los pesos sinápticos de las capas intermedias.

A diferencia de las neuronas que pertenecen a la *capa de salida* de la red MLP, las neuronas de las *capas intermedias* no tienen acceso a los valores deseados de las salidas. El ajuste de sus *pesos sinápticos* se realiza mediante estimaciones de los errores de salida causados por aquellas neuronas de la capa posterior, que ya han sido ajustadas.

$$\nabla E^{(2)} = \frac{\partial E}{\partial W_{ji}^{(2)}} = \frac{\partial E}{\partial Y_j^{(2)}} \cdot \frac{\partial Y_j^{(2)}}{\partial I_j^{(2)}} \cdot \frac{\partial I_j^{(2)}}{\partial W_{ji}^{(2)}} \quad \text{ec. 8}$$

De las definiciones anteriores se obtienen las ecuaciones 9, 10 y 11:

$$\frac{\partial Y_j^{(2)}}{\partial W_{ji}^{(2)}} = Y_j^{(2)} \quad \text{ec. 9} \quad \frac{\partial Y_j^{(2)}}{\partial I_j^{(2)}} = g'(I_j^{(2)}) \quad \text{ec. 10} \quad \frac{\partial E}{\partial Y_j^{(2)}} = - \sum_{k=1}^{n_2} \square \delta_k^{(2)} \cdot W_{kj}^{(2)} \quad \text{ec. 11}$$

Sustituyendo las ecuaciones 9, 10 y 11 en 8, obtenemos la ecuación 12:

$$\frac{\partial E}{\partial W_{ji}^{(2)}} = - \left(\sum_{k=1}^{n_2} \square \delta_k^{(2)} \cdot W_{kj}^{(2)} \right) \cdot g'(I_j^{(2)}) \cdot Y_i^{(1)} \quad \text{ec. 12}$$

Dónde $\delta_j^{(3)}$ se define como el *gradiente local* relacionado con la *j*-ésima *neurona* en la *capa de salida*, y está dado por la ecuación 13:

$$\delta_j^{(3)} = (d_j - Y_j^{(3)}) \cdot g'(I_j^{(3)}) \quad \text{ec. 13}$$

Por tanto, el ajuste de la *matriz de pesos* $W_{ji}^{(2)}$ debe realizarse en la dirección opuesta al *gradiente* para minimizar el error como lo muestra la ecuación 14:

$$\Delta W_{ji}^{(2)} = -\eta \cdot \frac{\partial E}{\partial W_{ji}^{(2)}} = \eta \cdot \left(\sum_{k=1}^{n_2} \square \delta_k^{(2)} \cdot W_{kj}^{(2)} \right) \cdot g'(I_j^{(2)}) \cdot Y_i^{(1)} \quad \text{ec. 14}$$

Ajustar los pesos sinápticos de la primera capa oculta

$$\nabla E^{(1)} = \frac{\partial E}{\partial W_{ji}^{(1)}} = \frac{\partial E}{\partial Y_j^{(1)}} \cdot \frac{\partial Y_j^{(1)}}{\partial I_j^{(1)}} \cdot \frac{\partial I_j^{(1)}}{\partial W_{ji}^{(1)}} \quad \text{ec. 15}$$

De las definiciones anteriores se obtiene ecuación 1.16, 1.17 y 1.18:

$$\frac{\partial Y_j^{(1)}}{\partial W_{ji}^{(1)}} = Y_i^{(1)} \quad \text{ec. 16} \quad \frac{\partial Y_j^{(1)}}{\partial I_j^{(1)}} = g'(I_j^{(1)}) \quad \text{ec. 17} \quad \frac{\partial E}{\partial Y_j^{(1)}} = - \sum_{k=1}^{n_2} \square \delta_k^{(2)} \cdot W_{kj}^{(2)} \quad \text{ec. 18}$$

Sustituyendo ecuaciones 16, 17 y 18 en 15, obtenemos la ecuación 19:

$$\frac{\partial E}{\partial W_{ji}^{(1)}} = - \left(\sum_{k=1}^{n_2} \square \delta_k^{(2)} \cdot W_{kj}^{(2)} \right) \cdot g'(I_j^{(1)}) \cdot X_i \quad \text{ec. 19}$$

Dónde $\delta_j^{(2)}$ se define como el *gradiente particular* con respecto a la *j*-ésima *neurona* de la *segunda capa intermedia*, ecuación 20:

$$\delta_j^{(2)} = - \left(\sum_{k=1}^{n_2} \square \delta_k^{(2)} \cdot W_{kj}^{(2)} \right) \cdot g'(I_j^{(2)}) \quad \text{ec. 20}$$

Por tanto, el ajuste de la *matriz de pesos* $W_{ji}^{(1)}$ debe realizarse en la dirección opuesta al *gradiente* para minimizar el error, empleando la ecuación 21:

$$\Delta W_{ji}^{(1)} = -\eta \cdot \frac{\partial E}{\partial W_{ji}^{(1)}} = \eta \cdot \left(\sum_{k=1}^{n_2} \square \delta_k^{(2)} \cdot W_{kj}^{(2)} \right) \cdot g'(I_j^{(1)}) \cdot X_i \quad \text{ec. 21}$$

Proceso de validación y prueba de las RNA

El proceso de validación se utiliza para decidir cuándo detener el *entrenamiento* y con ello evitar el sobreajuste que ocurre cuando el modelo se ha sobreentrenado. En la Figura 3 se describe dicho comportamiento, se ilustra el *error cuadrático medio* (MSE) de un conjunto de *entrenamiento* y prueba, en función del número de *iteraciones*. Se puede observar que el MSE en el conjunto de *entrenamiento* y en el conjunto de prueba disminuye a medida que se incrementa hasta cierto número de *iteraciones sucesivas* (n^1), posteriormente el MSE del conjunto de prueba comienza a aumentar mientras que el MSE del conjunto de *entrenamiento* continúa disminuyendo, esta

última región presenta un *sobreentrenamiento*. Para evitar dicho fenómeno, se suspende el *entrenamiento* cuando el MSE en el conjunto

de prueba es mínimo, lo que ocurre en n^1 *iteraciones* como se muestra en la Figura 4 (Dayhoff et al., 2001).



Figura 4. Comportamiento del sobreentrenamiento (Dayhoff et al., 2001).

La división aleatoria de una muestra en conjuntos de *entrenamiento* y prueba puede introducir sesgos en la selección y evaluación del *modelo*, en el sentido de que las características de la prueba pueden ser muy diferentes a las del *entrenamiento*, especialmente cuando se trata de muestras de tamaño pequeño. Por esta razón, es necesario emplear la *validación cruzada* para describir con precisión el *rendimiento* predictivo de las RNA (Zhang et al., 1999, Karimi et al., 2015)

La *validación cruzada* es una técnica basada en la división de datos para realizar evaluaciones predictivas de *modelos estadísticos*; consiste en dividir los datos disponibles en un conjunto de *entrenamiento* y uno de prueba, donde el modelo se ajusta a los datos de *entrenamiento*

y posteriormente se evalúa en función de sus predicciones sobre los datos de prueba. Al repetir este proceso para muchas divisiones diferentes de los datos, se estima el rendimiento predictivo promedio de uno o más *modelos* (Yates et al., 2023).

El aprendizaje de la red está relacionado con su *topología* o arquitectura, es decir, del número de capas, del número de *neuronas* en cada capa y del esquema de conexiones. El desempeño de la RNA se ve afectado por la *función de transferencia* y la arquitectura (Hemeida et al., 2020). Sin embargo, no es posible determinar teóricamente cuántas capas o *neuronas* ocultas se necesitan para cada problema (Benardos & Vosniakos, 2007; Rezakazemi et al., 2011).

Conclusión

Como conclusión se puede resumir que las RNA son sistemas de procesamiento de información, inspirados en el *modelo biológico* del sistema nervioso, y que tienen una característica fundamental referente a su habilidad para aprender a partir de datos externos o datos de entrada, mediante el ajuste de sus *interconexiones*.

Conflicto de intereses

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún conflicto de interés.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del escrito, se pueden compartir a solicitud directa del autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Descargo de Responsabilidad (Inteligencia Artificial) Los autores declaran por la presente que NO se han utilizado tecnologías de IA generativa, tales como modelos de lenguaje grandes (ChatGPT, COPILOT, etc.) y generadores de texto a imagen, durante la redacción o edición de este manuscrito.

Agradecimientos

Guadalupe Cuahuizo-Huitzil agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades Tecnología e Innovación (SECITHI) por la beca de estancia posdoctoral.

Referencias

- Krogh, A. (2008). What are artificial neural networks?. *Nature biotechnology*, 26(2), 195-197.
- Aggarwal, C. C. (2018). *Neural networks and deep learning* 10, No (978). Cham: springer.
- Wu, Y. C., & Feng, J. W. (2018). Development and application of artificial neural network. *Wireless Personal Communications*, 102(2), 1645-1656.
- Petrova, A. K., & Sinitca, A. M. (2021). Application of Neural Networks in the Tasks of Automation at Industrial Enterprises. In 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus) (pp. 577-581). IEEE.
- Huang, Y., Kangas, L. J., & Rasco, B. A. (2007). Applications of artificial neural networks (ANNs) in food science. *Critical reviews in food science and nutrition*, 47(2), 113-126.
- Pallathadka, H., Ramirez-Asis, E. H., Loli-Poma, T. P., Kaliyaperumal, K., Ventayen, R. J. M., & Naved, M. (2023). Applications of artificial intelligence in business management, e-commerce and finance. *Materials Today: Proceedings*, 80, 2610-2613.
- Dharmasaroja, P., & Kingkaew, N. (2016). Application of artificial neural networks for prediction of learning performances. In 2016 12th international conference on natural computation, fuzzy systems and knowledge discovery (icnc-fskd) pp. 745-751. IEEE.
- Gupta, N. (2013). Artificial neural network. *Network and Complex Systems*, 3(1), 24-28.
- Hajian & Styles. (2018). *Application of Soft Computing and Intelligent Methods in Geophysics*, Springer International Publishing AG, part of Springer Nature.
- Gurney, K. (2018). *An introduction to neural networks*. CRC press.
- Alarcón Celis Jaime. (2008). *Arquitectura inteligente basada en lógica reconfigurable aplicada a redes neuronales artificiales para la clasificación de información*. Tesis doctorado, Universidad Politécnica de Madrid.
- Amrutha, J., & Ajai, A. R. (2018). Performance analysis of backpropagation algorithm of artificial neural networks in verilog. In 2018 3rd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT), 1547-1550.
- Di Franco, G., & Santurro, M. (2021). Machine learning, artificial neural networks and social research. *Quality & quantity*, 55(3), 1007-1025.
- Haykin, S. (2009). *Neural networks and learning machines*, 3/E. Pearson Education India.
- Dike, H. U., Zhou, Y., Deveerasetty, K. K., & Wu, Q. (2018). Unsupervised learning based on artificial neural network: A review. In 2018 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems (CBS), 322-327. IEEE.
- Da Silva, I. N., Hernane Spatti, D., Andrade Flauzino, R., Liboni, L. H. B., dos Reis Alves, S. F., da Silva, I. N., ... & dos Reis Alves, S. F. (2017). Artificial neural network architectures and training processes, 21-28. Springer International Publishing.
- Liew, S. S., Khalil-Hani, M., & Bakhteri, R. (2016). Bounded activation functions for enhanced training stability of deep neural networks on visual pattern recognition problems. *Neurocomputing*, 216, 718-734.
- Berzal, F. (2018). *Redes Neuronales & Deep Learning*, Granada.
- Plagianakos, V. P., Magoulas, G. D., Nouis, N. K., & Vrahatis, M. N. (2001). Training multilayer networks with discrete activation functions. *IJCNN'01. International Joint Conference on Neural Networks. Proceedings*, 4, 2805-2810). IEEE.
- Rasamoelina, A. D., Adjailia, F., & Sincák, P. (2020). A review of activation function for artificial neural network. In 2020 IEEE 18th World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI), 281-286. IEEE.
- Essa, F. A., Abd Elaziz, M., & Elsheikh, A. H. (2020). An enhanced productivity prediction model of active solar still using artificial neural network and Harris Hawks optimizer. *Applied Thermal Engineering*, 170, 115020.
- Al-Shathir, A., Shakor, Z. M., Majdi, H. S., AbdulRazak, A. A., & Albayati, T. M. (2021). Comparison between artificial neural network and rigorous mathematical model in simulation of industrial heavy naphtha reforming process. *Catalysts*, 11(9), 1034.
- Asha, R. B., & KR, S. K. (2021). Credit card fraud detection using artificial neural network. *Global Transitions Proceedings*, 2(1), 35-41.

- Da Silva, I. N., Hernane Spatti, D., Andrade Flauzino, R., Liboni, L. H. B., dos Reis Alves, S. F., da Silva, I. N., ... & dos Reis Alves, S. F. (2017). Artificial neural network architectures and training processes, 21-28. Springer International Publishing.
- Hemeida, A. M., Hassan, S. A., Mohamed, A. A. A., Alkhalaf, S., Mahmoud, M. M., Senju, T., & El-Din, A. B. (2020). Nature-inspired algorithms for feed-forward neural network classifiers: A survey of one decade of research. *Ain Shams Engineering Journal*, 11(3), 659-675.
- Aljarah, I., Faris, H., Mirjalili, S., & Al-Madi, N. (2018). Training radial basis function networks using biogeography-based optimizer. *Neural Computing and Applications*, 29, 529-553.
- Salinas, D., Flunkert, V., Gasthaus, J., & Januschowski, T. (2020). DeepAR: Probabilistic forecasting with autoregressive recurrent networks. *International Journal of Forecasting*, 36(3), 1181-1191.
- Benardos, P. G., & Vosniakos, G. C. (2007). Optimizing feedforward artificial neural network architecture. *Engineering applications of artificial intelligence*, 20(3), 365-382.
- Rezakazemi, M., Razavi, S., Mohammadi, T., & Nazari, A. G. (2011). Simulation and determination of optimum conditions of pervaporative dehydration of isopropanol process using synthesized PVA-APTEOS/TEOS nanocomposite membranes by means of expert systems. *Journal of Membrane Science*, 379(1-2), 224-232.
- Dayhoff, J. E., & DeLeo, J. M. (2001). Artificial neural networks: opening the black box. *Cancer: Interdisciplinary International Journal of the American Cancer Society*, 91(S8), 1615-1635.
- Khatti, T., Naderi-Manesh, H., & Kalantar, S. M. (2019). Application of ANN and RSM techniques for modeling electrospinning process of polycaprolactone. *Neural Computing and Applications*, 31, 239-248.
- Kalantary, S., Jahani, A., Pourbabaki, R., & Beigzadeh, Z. (2019). Application of ANN modeling techniques in the prediction of the diameter of PCL/gelatin nanofibers in environmental and medical studies. *RSC advances*, 9(43), 24858-24874.
- Solis-Rios, D., Villarreal-Gómez, L. J., Goyes, C. E., Fonthal Rico, F., Cornejo-Bravo, J. M., Fong-Mata, M. B., ... & Mejía-Medina, D. A. (2023). A Neural Network Approach to Reducing the Costs of Parameter-Setting in the Production of Polyethylene Oxide Nanofibers. *Micromachines*, 14(7), 1410.
- Zhang, G., Hu, M. Y., Patuwo, B. E., & Indro, D. C. (1999). Artificial neural networks in bankruptcy prediction: General framework and cross-validation analysis. *European journal of operational research*, 116(1), 16-32.
- Dayhoff, J. E., & DeLeo, J. M. (2001). Artificial neural networks: opening the black box. *Cancer: Interdisciplinary International Journal of the American Cancer Society*, 91(S8), 1615-1635.
- Karimi, M. A., Pourhakkak, P., Adabi, M., Firoozi, S., Adabi, M., & Naghibzadeh, M. (2015). Using an artificial neural network for the evaluation of the parameters controlling PVA/chitosan electrospun nanofibers diameter. *e-Polymers*, 15(2), 127-138.
- Yates, L. A., Aandahl, Z., Richards, S. A., & Brook, B. W. (2023). Cross validation for model selection: a review with examples from ecology. *Ecological Monographs*, 93(1), e1557.

Recepción: 17.03.2026

Revisión: 31.03.2026

Publicación: 08.05.2026

<https://orcid.org/0009-0008-3233-3236>

<https://orcid.org/0009-0004-0663-5864>

<https://orcid.org/0009-0004-3791-1788>

<https://orcid.org/0000-0002-6041-9888>

<https://orcid.org/0000-0003-3564-0369>

EVOLUCIÓN E IMPORTANCIA DE LA SIMULACIÓN CLÍNICA EN LA ENSEÑANZA DE LA MEDICINA

THE EVOLUTION AND IMPORTANCE OF CLINICAL SIMULATION IN MEDICAL EDUCATION

Thais Lucía Grijalva Montano ⁽¹⁾
Ricardo de Jesús Rodríguez Lozano ⁽¹⁾
Paula Karen Cruz Laureano ⁽¹⁾
Ramiro José González Duarte ⁽²⁾
Verna Cázares Ordoñez ⁽³⁾

Facultad de Medicina, Centro de simulación Dra. Matilde Montoya Lafragua, Prol. 11 Sur 4713
Reforma Agua Azul. C.P. 72430 Heroica Puebla de Zaragoza, Pue.

⁽¹⁾ Médicos pasantes de Servicio Social.

Centro Universitario de la Salud, Complejo Regional Nororiental,
Arias y Blvd. s/n, El Carmen, C.P. 73800, Teziutlán, Puebla.

⁽²⁾ Coordinador de la Licenciatura en Químico Farmacobiólogo.

⁽³⁾ Coordinadora de la Licenciatura en Medicina General y Comunitaria.
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP)

*Autor de correspondencia: Thais Lucía Grijalva Montano,
thais.grijalva@alumno.buap.mx
ricardo.rodriguezlo@alumno.buap.mx
paula.cruz@alumno.buap.mx
ramiro.gonzalezd@correo.buap.mx
verna.cazares@correo.buap.mx

Resumen

La simulación clínica se ha consolidado como una de las estrategias educativas más relevantes en la formación de profesionales de la salud. Este artículo presenta una revisión histórica y conceptual sobre la evolución de la simulación en la educación médica, desde sus antecedentes en modelos anatómicos utilizados en la antigüedad hasta el desarrollo de simuladores de alta fidelidad en la educación médica contemporánea. Se analizan hitos históricos relevantes como los modelos obstétricos desarrollados por Madame du Coudray en el siglo XVIII, los primeros maniqués de entrenamiento para enfermería durante el siglo XX y la creación de simuladores médicos emblemáticos como Resusci Anne y Harvey. Asimismo, se abordan los fundamentos pedagógicos que sustentan la simulación clínica, incluyendo enfoques conductistas, cognitivistas, constructivistas y de aprendizaje experiencial. Adicionalmente, se examina la importancia de la simulación en la reducción de la brecha entre teoría y práctica, así como su impacto en la seguridad del paciente y en la formación de competencias clínicas. Finalmente, se describe la experiencia formativa en el Centro de Simulación “Dra. Matilde Montoya Lafragua” de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, destacando su papel en la preparación de estudiantes de las ciencias de la salud mediante escenarios clínicos controlados y realistas.

Palabras clave: Simulación clínica; educación médica; simuladores médicos; seguridad del paciente; formación en salud.

Abstract

Clinical simulation has become one of the most important educational strategies in the training of health professionals. This article presents a historical and conceptual overview of the evolution of simulation in medical education, from its early origins in anatomical models used in ancient civilizations to the development of high-fidelity simulators in contemporary medical training. Key historical milestones are discussed, including the obstetric training models developed by Madame du Coudray in the eighteenth century, the early nursing mannequins introduced in the twentieth century, and the creation of iconic medical simulators such as Resusci Anne and Harvey. The article also examines the educational foundations that support simulation-based learning, including behaviorist, cognitivist, constructivist, and experiential learning approaches. In addition, the role of simulation in reducing the gap between theoretical knowledge and clinical practice is analyzed, as well as its contribution to improving patient safety and the development of clinical competencies. Finally, the article describes the educational experience at the Simulation Center “Dra. Matilde Montoya Lafragua” of the Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, highlighting its role in preparing health sciences students through controlled and realistic clinical scenarios.

Keywords: Clinical simulation; medical education; medical simulators; patient safety; health sciences training.

Introducción

¿Simulación en la enseñanza de la medicina? ¿Para qué?

La palabra simulación proviene del latín *simulatio*, que significa la acción de imitar algo o representar una cosa fingiendo lo que no es. En el ámbito pedagógico, este concepto ha evolucionado hasta consolidarse como una metodología educativa robusta, que consiste en situar al estudiante en un entorno que reproduce o imita aspectos relevantes de la realidad. Dentro de este ambiente diseñado, se plantean situaciones similares a aquellas que el profesional deberá enfrentar en su práctica, favoreciendo el desarrollo de habilidades para la toma de decisiones y la actuación autónoma en escenarios reales (Piedrahita-Mejía & Cardona-Cano, 2022).

El desarrollo y consolidación de la simulación como estrategia de entrenamiento tienen antecedentes en disciplinas donde la seguridad y la toma de decisiones en situaciones críticas son fundamentales. La aviación es el ejemplo más emblemático y el que sentó las bases para la seguridad en salud. Los pilotos utilizan simuladores de vuelo de alta fidelidad para practicar maniobras de emergencia, aterrizajes en condiciones climáticas extremas y fallas mecánicas sin poner en riesgo vidas ni aeronaves. (Salas et al., 1998; Gaba, 2004).

En el ámbito militar, se utilizan simuladores para el manejo de vehículos pesados, tanques y sistemas de artillería. También se emplean para el entrenamiento táctico en entornos virtuales, donde los soldados deben tomar decisiones bajo presión extrema (Alexander et al., 2005).

En la ingeniería, los simuladores permiten evaluar la resistencia de estructuras o el comportamiento de sistemas eléctricos complejos antes de su construcción física, lo que contribuye a anticipar fallas y optimizar el diseño de los sistemas (Banks et al., 2010). Inspirada en estos modelos de entrenamiento seguro, la simulación fue incorporada progresivamente al campo de la salud. En este contexto, la simulación clínica se define como la inmersión del estudiante en un entorno diseñado para imitar aspectos específicos de la realidad. Este entorno controlado permite plantear situaciones o problemas clínicos similares a los que los estudiantes se enfrentarán con pacientes reales, pero con la posi-

bilidad de actuar de manera independiente y segura durante su formación (Dávila-Cervantes, 2014).

En consecuencia, la simulación clínica es una herramienta educativa que favorece el desarrollo de habilidades técnicas, competencias clínicas y toma de decisiones en el cuidado de la salud. A diferencia del modelo tradicional de enseñanza médica resumido en la frase “*ver uno, hacer uno y enseñar a uno*”, la simulación funciona como un puente pedagógico que reduce la brecha entre la observación y la práctica clínica real, permitiendo que los estudiantes desarrollen competencias en un entorno seguro antes de enfrentarse a situaciones reales con pacientes.

Historia de la simulación en la enseñanza de la medicina.

Al hablar de la historia de la simulación en la enseñanza de la medicina, podría pensarse que su implementación es reciente; sin embargo, sus raíces se remontan a la antigüedad. Desde el periodo comprendido entre 24,000 - 1600 a. C. se han encontrado en Eurasia tallas de piedra con forma humana. Aunque muchas de ellas tenían fines rituales o simbólicos, constituyen algunas de las primeras representaciones anatómicas utilizadas para comprender el cuerpo humano (Orringer et al., 2007; Ziv et al., 2003). Uno de los antecedentes más claros del concepto de simulación médica se encuentra en Babilonia (aprox. 2000 - 1600 a. C.), donde se empleaban modelos de hígados elaborados en arcilla que representaban con gran detalle la anatomía del órgano (figura 1). Estos modelos no eran simples representaciones artísticas; funcionaban como herramientas de aprendizaje y de predicción clínica, permitiendo a los antiguos médicos estudiar procesos patológicos y discutir posibles resultados de enfermedad sin la necesidad de la presencia directa del paciente (Bienstock & Heuer, 2022).

Hace más de 2.500 años ya se describían dispositivos que funcionaban como simuladores quirúrgicos rudimentarios, capaces incluso de reproducir sangrado o el flujo de líquidos durante los proce-

dimientos (Orringer et al., 2007; Ziv et al., 2003). En la Grecia antigua, Hipócrates ya señalaba la importancia del entrenamiento práctico y proponía que los aprendices desarrollaran sus habilidades mediante la práctica antes de atender pacientes reales (Hippocrates, 1983; Cook & Triola, 2009).



Figura 1. Antiguos modelos de arcilla de la anatomía humana recuperados de sitios en todo el Medio Oriente, África del Norte y Asia Central. Izquierda: ofrendas votivas anatómicas (Crédito: Museo Antiguo [Altes Museum], licencias Creative Commons CC BY 3.0. mediante Wikimedia Commons). Derecha: torso masculino votivo, romano, 200 a. C.-200 d. C. (Crédito: Museo de Ciencias [Science Museum], Londres. Atribución 4.0 Internacional [CC BY 4.0])

Posteriormente, durante la Dinastía Song en China (960-1279 d.C.), se utilizaron estatuas de bronce de tamaño real para enseñar anatomía (Needham, 2000). Siglos más tarde en el Renacimiento europeo, las restricciones legales y religiosas sobre la disección de cadáveres humanos llevaron al desarrollo de modelos anatómicos de cera, que permitían estudiar estructuras corporales con gran detalle (Bienstock & Heuer, 2022). Uno de los ejemplos más fascinantes de simulación médica temprana se encuentra en el siglo XVIII con Angélique Marguerite Le Boursier du Coudray (1712–1794), conocida como Madame

du Coudray, una destacada partera francesa que desarrolló uno de los primeros simuladores obstétricos de la historia. En una época en la que la mortalidad materna e infantil era extremadamente alta y la formación formal de parteras era limitada, Madame du Coudray ideó un modelo anatómico conocido como “La Machine” (figura 2). Este dispositivo era un maniquí obstétrico elaborado con tela, cuero y rellenos de algodón, diseñado para reproducir la anatomía del aparato reproductor femenino y permitir la simulación del parto. El modelo incluía un útero flexible, un canal vaginal y un feto articulado, lo que permitía representar diferentes posiciones fetales y complicaciones obstétricas. Gracias a este simulador, las aprendices podían practicar maniobras de parto, reconocer presentaciones anómalas y aprender técnicas para resolver complicaciones, todo ello sin poner en riesgo a una mujer embarazada.



Figura 2. “La Machine” de Madame du Coudray. La matrona que salvó vidas con un maniquí. Tomado de <https://vein.es/la-matrona-que-salvo-vidas-con-un-maniqui/>

El impacto de esta innovación fue notable. En 1759, el rey Luis XV encargó a Madame du Coudray recorrer las zonas rurales de Francia para capacitar a parteras utilizando su simulador. Durante más de dos décadas viajó por el país impartiendo cursos prácticos y se estima que entrenó a más de 10,000 parteras y médicos, contribuyendo significativamente a mejorar la atención obstétrica en Francia. Además, publicó en 1759 el tratado *Abrégé de l'art des accouchements*, un manual ilustrado que complementaba la enseñanza práctica con su simulador (Salas et al., 1998; Gaba, 2004). Durante el siglo XX comenzaron a surgir inno-

vaciones que marcarían el inicio de la simulación moderna en salud. Uno de los primeros ejemplos ocurrió en 1911, cuando la fabricante estadounidense Martha Jenks Chase desarrolló una muñeca de tamaño humano diseñada para la enseñanza de cuidados de enfermería. Este maniquí, conocido posteriormente como “Mrs. Chase”, fue creado a solicitud de la Escuela de Enfermería del Hartford Hospital en Estados Unidos. Su diseño incluía articulaciones móviles que permitían a los estudiantes practicar procedimientos básicos como movilización del paciente, cambios de posición, higiene y colocación de vendajes. Este modelo se convirtió en uno de los primeros simuladores ampliamente utilizados en la educación sanitaria y sentó las bases para el desarrollo posterior de maniqués clínicos más avanzados (Aebersold, 2016; Bienstock et al., 2022). A partir de estas primeras experiencias con modelos de entrenamiento, la simulación clínica comenzó a evolucionar hacia dispositivos cada vez más especializados, diseñados para enseñar procedimientos médicos específicos. Un avance decisivo ocurrió en 1960, cuando el médico Peter Safar, pionero de la reanimación cardiopulmonar moderna, y el anesthesiólogo Bjørn Lind colaboraron con el fabricante noruego de juguetes Åsmund Laerdal para desarrollar Resusci Anne, un maniquí diseñado específicamente para el entrenamiento en reanimación cardiopulmonar (RCP). Este simulador permite practicar compresiones torácicas y ventilación boca a boca de forma repetida y segura, lo que facilita la difusión masiva de la enseñanza de la RCP en profesionales de la salud y en la población general. Resusci Anne se convirtió rápidamente en uno de los simuladores médicos más influyentes del siglo XX y sigue utilizándose en la actualidad en programas de capacitación en emergencias (Cooper & Taqueti, 2008; Bienstock et al., 2022). Pocos años después, en 1968, el cardiólogo estadounidense Michael S. Gordon presentó Harvey, uno de los primeros simuladores clínicos diseñados para reproducir hallazgos cardiovasculares complejos (figura 3). Este maniquí permitía simular múltiples enfermedades cardíacas, incluyendo diferentes tipos de soplos, pulsos arteriales y variaciones en la auscultación car-

díaca. Harvey permitió a los estudiantes practicar el examen físico cardiovascular de manera sistemática y repetida, mejorando significativamente el aprendizaje de habilidades diagnósticas en cardiología (Cooper & Taqueti, 2008; Urdaneta, 2021).



Figura 3. Michael Gordon haciendo una demostración del simulador original de cardiología Harvey®. Reutilizado con permiso de Cooper J. B. y Taqueti, V. R. A brief history of the development of mannequin simulators for clinical education and training. *Postgrad Med J*. 2008; 84: 563–570.

Posteriormente, en la década de 1980 surgió la simulación de alta fidelidad (high-fidelity simulation, HF) con el desarrollo de simuladores computarizados utilizados inicialmente en el campo de la anestesiología. Estos sistemas permitían recrear respuestas fisiológicas realistas del paciente y simular escenarios clínicos complejos, lo que representó un avance significativo en la enseñanza médica basada en simulación (Bienstock & Heuer, 2022; Cooper & Taqueti, 2008). El desarrollo de estos simuladores estuvo fuertemente influenciado por los modelos de entrenamiento utilizados en la aviación, donde los simuladores de vuelo ya habían demostrado ser herramientas eficaces para mejorar la seguridad y el desempeño profesional. Inspirados en este enfoque, investigadores en anestesiología comenzaron a diseñar sistemas capaces de reproducir cambios en variables fisiológicas

como frecuencia cardíaca, presión arterial, ventilación, saturación de oxígeno y respuesta a medicamentos, permitiendo que los estudiantes enfrentaran situaciones críticas en un entorno controlado. Uno de los hitos de este periodo fue el desarrollo del CASE (Comprehensive Anesthesia Simulation Environment) en la Universidad de Stanford, considerado uno de los primeros sistemas computarizados diseñados específicamente para el entrenamiento en anestesia (Gaba, 2004; Cooper & Taqueti, 2008). Con el tiempo, los simuladores de alta fidelidad evolucionaron hacia sistemas cada vez más sofisticados, capaces de integrar monitoreo fisiológico,

software de simulación clínica y entornos hospitalarios recreados, consolidando la simulación como una herramienta central en la formación de profesionales de la salud y en los programas de seguridad del paciente (Bienstock et al., 2022; Gaba, 2004). Con el desarrollo de nuevas tecnologías, los sistemas de simulación comenzaron a clasificarse según el grado de realismo que ofrecen durante el entrenamiento. De manera general, los simuladores utilizados en educación médica se agrupan en simulación de baja fidelidad, fidelidad intermedia y alta fidelidad, dependiendo de la complejidad del modelo y de las variables fisiológicas que pueden reproducir (Tabla 1).

Tabla 1. Clasificación de los simuladores utilizados en educación médica según su nivel de fidelidad.

Tipo de simulación	Características
Baja fidelidad.	Simuladores de un segmento anatómico utilizados para practicar procedimientos específicos, como exploración ginecológica, aplicación de inyecciones intramusculares o intravenosas y toma de presión arterial.
Fidelidad intermedia.	Combina el uso de modelos anatómicos con sistemas computarizados que permiten modificar ciertas variables fisiológicas.
Alta fidelidad.	Simuladores computarizados que integran múltiples variables fisiológicas mediante hardware y software avanzados, permitiendo recrear escenarios clínicos complejos como parto, intubación endotraqueal, RCP o atención de pacientes en terapia intensiva.

Fuente: tomado de Dávila-Cervantes, 2014.

En la actualidad, el entrenamiento basado en simulación se estructura en torno a escenarios clínicos cuidadosamente diseñados, procesos de retroalimentación (debriefing) y evaluación de resultados, elementos considerados fundamentales para consolidar el aprendizaje. Este enfoque permite a los estudiantes practicar habilidades clínicas en un entorno seguro, integrar fundamentos teóricos con la práctica y desarrollar competencias para el análisis clínico y la toma de decisiones en situaciones complejas (Mawyin-Muñoz, 2025; Aebbersold, 2016). Además, las proyecciones indican que el uso de

simulación en educación médica continuará creciendo de manera sostenida en los próximos años. Este incremento está impulsado por la incorporación de tecnologías emergentes, como la realidad virtual, la realidad aumentada, la realidad mixta y los entornos inmersivos, que permiten recrear escenarios clínicos con un alto grado de realismo. Estas herramientas facilitan el entrenamiento repetitivo de procedimientos y el desarrollo de habilidades clínicas avanzadas sin la necesidad de involucrar directamente a un paciente, lo que contribuye a mejorar la seguridad en la práctica médica y la calidad de la formación profesional (Smith, 2021).

Historia de los simuladores Laerdal.

La empresa Laerdal Medical, fundada en 1940 en Stavanger, Noruega, ha desempeñado un papel fundamental en el desarrollo de la simulación médica moderna. A lo largo de su historia, la compañía ha contribuido a transformar la educación en salud al promover el entrenamiento mediante práctica repetida y controlada de habilidades clínicas, permitiendo que estudiantes y profesionales perfeccionen procedimientos sin poner en riesgo a pacientes reales. Uno de sus desarrollos más influyentes fue el maniquí de reanimación cardiopulmonar Resusci Anne, considerado un hito en la formación médica basada en simulación (Laerdal Medical, 2024; Laerdal Museum of Medicine, 2024). Curiosamente, la empresa no comenzó en el ámbito médico. En sus inicios, Åsmund S. Laerdal, su fundador, se dedicó a la publicación de libros infantiles y a la fabricación de juguetes. Durante la década de 1940, la empresa producía principalmente juguetes de madera; sin embargo, tras la Segunda Guerra Mundial incorporó el uso de plásticos blandos y flexibles, lo que representó una innovación importante dentro de la industria juguetera europea. Gracias a esta tecnología, en 1950 la compañía desarrolló una muñeca llamada Anne, una figura infantil con cabello rubio, ojos azules y párpados móviles que se cerraban cuando la muñeca se colocaba en posición horizontal (Laerdal Museum of Medicine, 2024). Años después, esta experiencia en el diseño de muñecos realistas resultaría clave para el desarrollo de simuladores médicos. De hecho, el rostro del futuro maniquí de entrenamiento en reanimación cardiopulmonar tendría un origen inesperado y envuelto en cierta historia legendaria. Según diversos relatos, Åsmund Laerdal decidió que el rostro del maniquí debía ser femenino, ya que consideraba que esto haría que los estudiantes se sintieran más cómodos durante las prácticas de ventilación boca a boca, evitando que el entrenamiento resultara intimidante. El modelo facial elegido fue una máscara mortuoria conocida como "L'Inconnue de la Seine" (La desconocida del Sena), que data de finales del siglo XIX. La máscara supuestamente pertenecía a una joven que habría sido encontrada ahogada

en el río Sena en París hacia la década de 1880 (figura 4). Aunque las circunstancias de su muerte nunca se esclarecieron y existen debates históricos sobre la veracidad de la historia, la serenidad de su expresión hizo que su máscara se popularizara ampliamente en Europa como objeto artístico. Con el tiempo, esta imagen se convertiría en el rostro del maniquí Resusci Anne, uno de los simuladores médicos más conocidos del mundo (White Cross Training, 2023; Cooper & Taqueti, 2008).



Figura 4. Máscara mortuoria, autor desconocido, hacia 1900. <https://www.whitecrosstraining.co.uk/the-origins-of-the-cpr-resusci-anne-doll/>

Antes de su incursión definitiva en el campo de la educación médica, Laerdal ya había comenzado a colaborar con instituciones de emergencia. En 1953, la Defensa Civil de Noruega solicitó a la empresa que desarrollara modelos realistas de lesiones para prácticas de primeros auxilios y manejo de desastres. Como resultado, Laerdal

creó un conjunto de 33 simulaciones de heridas, quemaduras y traumatismos elaboradas con plástico flexible que podía adherirse a la piel. Estos modelos permitían recrear escenarios de emergencia con mayor realismo y fueron ampliamente utilizados en ejercicios de entrenamiento de personal de rescate y atención prehospitalaria (Laerdal Museum of Medicine, 2024).



Figura 5. Conjunto de heridas "Practoplast", hacia 1950. Tomado de <https://medicine.museum/firms/8-Laerdal-Stationer-Norway>

El verdadero punto de inflexión ocurrió a finales de la década de 1950, cuando los investigadores Peter Safar y James Elam demostraron científicamente la eficacia de la ventilación boca a boca y las compresiones torácicas para la reanimación cardiopulmonar.

Ante la necesidad de entrenar a médicos y personal sanitario en estas técnicas, Safar contactó con Åsmund Laerdal para desarrollar un maniquí que permitiera practicar la RCP de forma segura y repetida. Tras casi dos años de desarrollo, en 1960 Laerdal presentó el primer prototipo de Resusci Anne. El diseño incorporaba características innovadoras para la época, como una vía aérea para practicar ventilación boca a boca y un tórax flexible que

simulaba el movimiento durante las compresiones torácicas. El modelo fue presentado ante destacados especialistas en reanimación, entre ellos Peter Safar, James O. Elam y Archer S. Gordon, quienes colaboraron en su validación clínica y en el perfeccionamiento del simulador (Cooper & Taqueti, 2008; Ben Ahmed, H., & Dziri, C. 2020).

El impacto de Resusci Anne fue inmediato. Por primera vez, los profesionales de la salud podían practicar repetidamente maniobras de reanimación sin poner en riesgo a un paciente real, lo que facilitó la difusión global de la enseñanza de la RCP. De hecho, millones de personas en todo el mundo han utilizado este maniquí; por ello, Resusci Anne es uno de los simuladores médicos más influyentes del siglo XX.

El desarrollo de Resusci Anne marcó el inicio de una nueva etapa en la educación médica, en la que los simuladores comenzaron a utilizarse de manera sistemática para entrenar habilidades clínicas complejas, sentando las bases de los sistemas de simulación de alta fidelidad actuales.

A medida que la empresa consolidaba su presencia en el ámbito sanitario, Laerdal comenzó a colaborar estrechamente con organizaciones médicas internacionales. En 1974, participó en el apoyo a la difusión de las primeras guías de reanimación cardiopulmonar publicadas por la American Heart Association en el *Journal of the American Medical Association (JAMA)*, lo que contribuyó a estandarizar la enseñanza de estas técnicas a nivel global.

Posteriormente, en 1978, la empresa decidió concentrar su actividad exclusivamente en el desarrollo de tecnologías y simuladores destinados a salvar vidas. Desde entonces, Laerdal ha ampliado su catálogo con simuladores cada vez más sofisticados destinados al entrenamiento de profesionales de la salud en diversas áreas clínicas. Actualmente existen modelos diseñados para representar pacientes adultos, pediátricos, recién nacidos, prematuros y mujeres embarazadas, así como simuladores capaces de reproducir múltiples variables fisiológicas para recrear escenarios clínicos complejos en entornos de simulación avanzada (Ben Ahmed, H., & Dziri, C. 2020).

Bases educativas y resultados de la simulación en el área de la salud.

Tradicionalmente, la educación en las ciencias de la salud se ha centrado en la transmisión de conocimientos teóricos, como conceptos, protocolos clínicos, guías de práctica y fundamentos científicos. Estos aprendizajes suelen evaluarse mediante exámenes diseñados para medir la comprensión y retención de información. Si bien este modelo ha permitido formar generaciones de profesionales, también tiene limitaciones para trasladar el conocimiento teórico a la práctica clínica real. En la práctica cotidiana de la medicina y otras profesiones sanitarias no basta con conocer la teoría; es necesario saber aplicarla en contextos complejos, tomar decisiones clínicas oportunas y trabajar en equipos interdisciplinarios junto con médicos, enfermeras, químicos y otros profesionales de la salud. En este escenario, la simulación clínica ha surgido como una estrategia educativa que permite integrar conocimientos, habilidades técnicas, razonamiento clínico y competencias de comunicación en un entorno seguro y controlado.

La simulación clínica se apoya en diversas teorías del aprendizaje ampliamente estudiadas en psicología y pedagogía. Desde la perspectiva conductista, investigadores como Ivan Pavlov y B. F. Skinner demostraron que el aprendizaje puede fortalecerse mediante reforzamientos ante determinadas respuestas observables. En la educación en salud, este enfoque se refleja en la repetición de procedimientos y en la retroalimentación recibida durante el entrenamiento (Rognoni Amrein, 2024).

No obstante, la simulación moderna busca superar modelos educativos basados en el castigo ante el error. En lugar de ello, promueve un entorno de aprendizaje seguro, donde los errores se analizan como oportunidades para mejorar el desempeño clínico.

La simulación también incorpora principios del cognitivismo, asociados a autores como Jean Piaget, quien propuso que el aprendizaje depende de procesos mentales como la atención, la memoria, el razonamiento y la resolución de problemas. En los escenarios de simulación, los estudiantes deben analizar información clínica, interpretar signos y

síntomas y tomar decisiones diagnósticas y terapéuticas, lo que estimula estos procesos cognitivos. Asimismo, la simulación se vincula con la teoría constructivista, que sostiene que el conocimiento se construye activamente a partir de la experiencia. Por esta razón, los escenarios simulados buscan recrear contextos clínicos realistas que permitan a los estudiantes participar activamente en la resolución de problemas y en la aplicación del conocimiento teórico (Rognoni Amrein, 2024). En el ámbito de la educación médica también es fundamental considerar el enfoque humanista del aprendizaje, representado por autores como Abraham Maslow y Carl Rogers, quienes destacan la importancia de crear entornos educativos donde los estudiantes se sientan respetados, comprendidos y emocionalmente seguros. Este enfoque resulta especialmente relevante en profesiones donde la interacción con pacientes requiere empatía, comunicación efectiva y sensibilidad ante situaciones de vulnerabilidad.

Uno de los modelos educativos más utilizados en simulación es el ciclo de aprendizaje experiencial de David Kolb, que describe el aprendizaje como un proceso compuesto por cuatro etapas: experiencia concreta, observación reflexiva, conceptualización abstracta y experimentación activa. En la simulación clínica, los estudiantes participan en un escenario clínico, analizan posteriormente lo ocurrido, identifican principios aplicables y ponen en práctica nuevas estrategias en situaciones futuras (Rognoni Amrein, 2024).

Un elemento central de esta metodología es el debriefing, un proceso estructurado de reflexión posterior a la simulación. Durante esta etapa, los participantes analizan sus decisiones, emociones y comportamientos durante el ejercicio. Este componente resulta fundamental, ya que el desempeño en situaciones críticas no depende únicamente del conocimiento técnico, sino también del manejo emocional y del trabajo en equipo (Seam et al., 2019). De esta manera, la simulación clínica se basa en el aprendizaje experiencial y en la reflexión sobre el error y permite que los estudiantes identifiquen

fortalezas y áreas de mejora en un entorno seguro. A través de la repetición deliberada de escenarios clínicos, es posible perfeccionar habilidades técnicas y no técnicas mediante experiencias educativas reproducibles, estandarizadas y orientadas al desarrollo de competencias (Martínez, 2025).

Importancia de la implementación de la simulación en la enseñanza de la salud.

El entrenamiento basado en simulación ha demostrado ser una herramienta eficaz para mejorar la seguridad y el desempeño profesional en diversas industrias, entre ellas la aviación y la atención médica. En estos sectores, la simulación permite entrenar procedimientos complejos en entornos controlados antes de enfrentarse a situaciones reales (Bambakidis et al., 2013). En el campo de la salud, esta metodología permite recrear escenarios clínicos realistas e inmersivos y favorece el desarrollo de habilidades técnicas, el razonamiento clínico y el trabajo en equipo antes del contacto directo con los pacientes (Elendu et al., 2024). Uno de los principales retos en la formación sanitaria es la llamada “brecha teoría-práctica”, que describe la dificultad para trasladar los conocimientos adquiridos en el aula al ejercicio clínico. Entre las causas de este fenómeno se encuentran el aumento del número de estudiantes, las limitaciones éticas en la práctica de procedimientos directamente en pacientes y la falta de espacios estructurados para aplicar el conocimiento teórico (Daneshfar et al., 2025). Como consecuencia, muchos estudiantes experimentan ansiedad e inseguridad al enfrentarse por primera vez a escenarios clínicos reales, lo que puede afectar su capacidad para tomar decisiones clínicas oportunas. La seguridad del paciente representa un desafío global. Se estima que los errores médicos prevenibles causan aproximadamente 400.000 muertes al año en Estados Unidos, además de millones de casos de discapacidad. En México, diversos estudios han señalado que cerca del 78,8 % de los médicos residentes reconocen haber cometido o presenciado errores clínicos, frecuentemente relacionados con insuficiencia del entrenamiento práctico (ONU, 2019). En este contexto, la simulación clínica se ha consolidado como una herramienta educativa clave. Durante las últimas dos décadas su uso ha crecido de manera significativa; sin embargo, aún se consi-

dera subutilizada en muchos programas de formación sanitaria, a pesar de la evidencia que demuestra su impacto positivo en la seguridad del paciente. Con el objetivo de fortalecer la formación clínica y promover la práctica colaborativa interprofesional, diversas instituciones han comenzado a implementar centros especializados de simulación. En este marco, la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) inauguró el 29 de agosto de 2024 el Centro de Simulación “Dra. Matilde Montoya Lafragua”, un espacio con tecnología avanzada diseñado para el entrenamiento de estudiantes de las ciencias de la salud. Se estima que este centro impactará en la formación de más de 25.000 estudiantes de licenciatura y posgrado, contribuyendo al desarrollo de competencias clínicas y a la mejora de la seguridad en la atención médica.

Experiencias personales.

El servicio social médico es una etapa crucial de aprendizaje y maduración profesional. Para nosotros, este año no ha sido la excepción. Al inicio de esta etapa, el concepto de simulación clínica resultaba prácticamente desconocido en nuestra formación previa; sin embargo, pronto descubrimos el valor estratégico que esta herramienta posee para el desarrollo de competencias médicas orientadas a nuestra práctica profesional futura. Nuestro primer acercamiento consistió en familiarizarnos con la operatividad de diversos simuladores clínicos. Desde el principio nos resultó fascinante explorar su complejidad estructural y comprender el avance científico y tecnológico que respalda estas herramientas educativas. Una vez dominado el manejo técnico de los simuladores, comenzamos a descubrir su verdadero potencial al explorar los escenarios clínicos que permiten recrear.

En colaboración con docentes de distintas facultades que participan en las actividades del Centro de Simulación, tuvimos la oportunidad de involucrarnos en el diseño y desarrollo de prácticas dinámicas dirigidas a los estudiantes que visitan este espacio. El objetivo central de estas actividades es claro: proporcionar a los estudiantes el conocimiento, las habilidades y la confianza necesarios para actuar con precisión cuando enfren-

situaciones clínicas similares en escenarios reales con pacientes, mientras fortalecemos nuestros propios conocimientos y habilidades prácticas. La respuesta de los estudiantes ha sido particularmente alentadora. A través de su retroalimentación hemos observado un incremento significativo en su confianza y seguridad, resultado de un proceso de aprendizaje basado en la práctica deliberada y la repetición en un entorno controlado y seguro. Nuestra experiencia en el centro de simulación ha

sido enriquecedora en múltiples dimensiones. Más allá del aprendizaje técnico, esta experiencia nos ha permitido descubrir un campo innovador en la educación médica que hasta hace poco desconocíamos. Hoy estamos convencidos de que la simulación clínica no solo es una herramienta educativa eficaz, sino también un elemento clave en la transformación del futuro de la formación en salud, al preparar a los profesionales para enfrentar con mayor seguridad y competencia los desafíos de la práctica clínica.

Conclusiones y reflexiones finales.

La evolución de la simulación médica refleja el compromiso ético de la educación en salud con la protección de la vida humana. Desde los antiguos modelos de arcilla utilizados para representar órganos hasta los actuales simuladores de alta fidelidad capaces de recrear escenarios clínicos complejos, la simulación transformó la manera en que se forman los profesionales de la salud. En un contexto en el que las iatrogenias continúan siendo una causa importante de mortalidad y discapacidad prevenible, la simulación clínica se consolida como una herramienta fundamental para reducir riesgos en la práctica médica. Al ofrecer entornos de aprendizaje seguros, se permite que los estudiantes practiquen, se equivoquen, reflexionen y perfeccionen sus habilidades antes de enfrentarse a pacientes reales.

El Centro de Simulación “Dra. Matilde Montoya Lafragua” de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla representa un ejemplo de esta transformación educativa. Mediante la tecnología avanzada y los escenarios clínicos realistas, este espacio fortalece la formación de estudiantes de las ciencias de la salud y contribuye a cerrar la brecha entre la teoría y la práctica. Así, la simulación clínica se consolida como una herramienta indispensable para la educación médica contemporánea. Más que una innovación tecnológica, representa una estrategia para formar profesionales capaces de integrar conocimiento, habilidades técnicas y sensibilidad humana, recordándonos que la simulación no es el futuro de la medicina, sino el presente que está ayudando a salvar vidas.

Conflicto de intereses

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Descargo de Responsabilidad (Inteligencia Artificial)

Los autores declaran por la presente que NO se han utilizado tecnologías de IA generativa, tales como modelos de lenguaje grandes (ChatGPT, COPILOT, etc.) y generadores de texto a imagen, durante la redacción o edición de este manuscrito.

Agradecimientos

Como pasantes de servicio social en medicina agradecemos la invitación, así como la colaboración y guía de los Doctores Ramiro José González Duarte y Verna Cázares Ordoñez, docentes del Centro Universitario de la Salud del Complejo Regional Nororiental de la BUAP, para la elaboración del trabajo aquí presentado, de igual manera al Maestro Alejandro Torres por permitirnos ser partícipes, facilitadores y colaboradores de escenarios de simulación para así, poder no solamente vivir sino entender este nuevo modelo de aprendizaje y al mismo tiempo damos las gracias a la Doctora Evert Bustos Yong y al Maestro Jorge Avelino Solís por abrirnos las puertas al Centro de Simulación “Dra. Matilde Montoya Lafragua” y permitirnos aprender y dominar el uso de todos los simuladores que tiene la institución desde baja hasta alta fidelidad. La Dra. Verna Cázares Ordoñez agradece especialmente a la Mtra. Yara Gracia Verónica, del Centro de Simulación, por su apoyo en la gestión que ha permitido que los estudiantes del Complejo Regional Nororiental realicen sus prácticas en el Centro de Simulación.

Referencias

- Aebersold, M. (2016). The history of simulation and its impact on the future. *AACN Advanced Critical Care*, 27(1), 56–61. <https://doi.org/10.4037/aacnacc2016436>
- Alexander, A. L., Brunyé, T., Sidman, J., y Weil, S. A. (2005). From gaming to training: A review of studies on fidelity, immersion, presence, and buy-in and their effects on transfer in PC-based simulations and games. *DARWARS Training Impact Group*.
- Bambakidis, N. C., Selman, W. R., y Nicholas, J. S. (2013). Simulation in neurosurgery: A brief review and future directions. *Neurosurgery*, 73(Suppl. 1), 3–8. <https://doi.org/10.1227/NEU.0000000000000093>
- Banks, J., Carson, J. S., Nelson, B. L., y Nicol, D. M. (2010). *Discrete-event system simulation* (5.ª ed.). Pearson.
- Ben Ahmed, H., y Dziri, C. (2020). History of medical simulation. *La Tunisie Medicale*, 98(12), 892–894.
- Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. (29 de agosto de 2024). Inaugura la BUAP su Centro de Simulación "Dra. Matilde Montoya Lafragua". *Boletín BUAP*. <https://boletin.buap.mx/node/3572>
- Bienstock, J. L., y Heuer, A. (2022). A review on the evolution of simulation-based training to help build a safer future. *Medicine*, 101(25), Artículo e29503. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000029503>
- Cook, D. A., y Triola, M. M. (2009). Virtual patients: A critical literature review and proposed next steps. *Medical Education*, 43(4), 303–311. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2923.2008.03286.x>
- Cooper, J. B., y Taqueti, V. R. (2008). A brief history of the development of mannequin simulators for clinical education and training. *Postgraduate Medical Journal*, 84(996), 563–570. <https://doi.org/10.1136/pgmj.2008.068643>
- Daneshfar, M., y Moonaghi, H. K. (2025). The impact of clinical simulation on bridging the theory–practice gap in nursing education: A systematic review. *BMC Medical Education*, 25, Artículo 1216. <https://doi.org/10.1186/s12909-025-07790-8>
- Dávila-Cervantes, C. A. (2014). Simulación en educación médica. *Investigación en Educación Médica*, 3(10), 100–105.
- Elendu, C., Amaechi, D. C., Okatta, A. U., Amaechi, E. C., Elendu, T. C., Ezech, C. P., Ebuka, C. J., Chinyere, O. J., y Stephen, O. C. (2024). The impact of simulation-based training in medical education: A review. *Medicine*, 103(27), Artículo e38813. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000038813>
- Gaba, D. M. (2004). The future vision of simulation in health care. *Quality and Safety in Health Care*, 13(Suppl. 1), i2–i10. <https://doi.org/10.1136/qshc.2004.009878>
- Gelbart, N. (1998). *The King's midwife: A history and mystery of Madame du Coudray*. University of California Press.
- Hippocrates. (1983). *Hippocratic writings*. Penguin Classics.
- Laerdal Medical. (2024). History of Laerdal and Resusci Anne. <https://laerdal.com/about-us/history/>
- Laerdal Museum of Medicine. (2024). Laerdal Stavanger Norway manufacturer of Resusci Anne and SimMan 3G. <https://medicine.museum/firms/8-Laerdal-Stavanger-Norway>
- Martínez, F., Montmany, S., Rebasa, P., Luna, A., Carol, F., y Navarro, S. (2025). Práctica clínica vs. simulación clínica: ¿Qué impacto tienen en el aprendizaje de los estudiantes de medicina? *Educación*

- Médica, 26(2), Artículo 101001. <https://doi.org/10.1016/j.edumed.2024.101001>
- Mawyin-Muñoz, C. E., Salmerón-Escobar, F. J., Hidalgo-Acosta, J. A., y Calderón-León, M. F. (2025). Medical simulation: An essential tool for training, diagnosis, and treatment in the 21st century. *BMC Medical Education*, 25, Artículo 1019. <https://doi.org/10.1186/s12909-025-07610-z>
- Needham, J. (2000). *Science and civilisation in China: Volume 6, Biology and biological technology; Part 6, Medicine*. Cambridge University Press.
- Noticias ONU. (17 de septiembre de 2019). Cada minuto mueren cinco pacientes por errores médicos. <https://news.un.org/es/story/2019/09/1462252>
- Orringer, M. B., Minter, R. M., Cassivi, S. D., Meyerson, S. L., Seshadri, K., y Lynch, J. P. (2007). Simulation in surgical education. *Annals of Surgery*, 245(5), 812–818. <https://doi.org/10.1097/01.sla.0000259430.40051.48>
- Piedrahita-Mejía, J. C., y Cardona-Cano, R. (2022). The history of the simulation concept and its use in educational environments in the health sector. *Duazary*, 19(4), 251–254. <https://doi.org/10.21676/2389783x.4988>
- Rognoni Amrein, G., Benet Bertran, P., Castro Salomó, A., Gomar Sancho, C., Villalonga Vadell, R., y Zorrilla Riveiro, J. (2024). La simulación clínica en la educación médica. *Medicina Clínica Práctica*, 7(4), Artículo 100459. <https://doi.org/10.1016/j.mcpsp.2024.100459>
- Salas, E., Bowers, C. A., y Rhodenizer, L. (1998). It is not how much you have but how you use it: Toward a rational use of simulation to support aviation training. *International Journal of Aviation Psychology*, 8(3), 197–208. https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0803_2
- Seam, N., Lee, A. J., Vennerio, M., y Emet, L. (2019). Simulation training in the ICU. *Chest*, 156(6), 1223–1233. <https://doi.org/10.1016/j.chest.2019.07.011>
- Smith, C. R., y Peng, Y. G. (2021). The evolution and role of simulation in medical education. *APSF Newsletter*, 36(1). <https://www.apsf.org/article/the-evolution-and-role-of-simulation-in-medical-education/>
- Urdaneta, F. (2021). Historia de la simulación médica: Harvey y los simuladores cardiovasculares. *APSF Newsletter* (Edición en español), 36(1).
- White Cross Training. (2023). The origins of the CPR Resusci Anne doll. <https://www.whitecrosstraining.co.uk/the-origins-of-the-cpr-resusci-anne-doll>
- Ziv, A., Wolpe, P. R., Small, S. D., y Glick, S. (2003). Simulation-based medical education: An ethical imperative. *Academic Medicine*, 78(8), 783–788. <https://doi.org/10.1097/00001888-200308000-00006>

Recepción: 27.02.2026

Revisión: 31.03.2026

Publicación: 08.05.2026

<https://orcid.org/0009-0003-6859-7587>

<https://orcid.org/0000-0003-4392-7028>

<https://orcid.org/0009-0003-1371-7166>

NANOTECNOLOGÍA: DE LA PROMESA A LA PREOCUPACIÓN

NANOTECHNOLOGY: FROM PROMISE TO CONCERN

Cristian-Brayan Palacios-Cabrera* ¹

Alan-Javier Santiago-Cuevas¹

Eduardo-Daniel Tecuapa-Flores²

¹ Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria,
Ciudad de México

² Grupo de Investigación Desarrollo e Innovación en Ingeniería
de Procesos y Nuevos Materiales, Vicerrectoría de Investigación,
Universidad La Salle México, Ciudad de México 06140, México

Correos:

palacios_cabrera@hotmail.com

alan_javier_sc@hotmail.com

daniel.tecuapa@lasalle.mx

Resumen

La nanotecnología ha experimentado un crecimiento acelerado en las últimas décadas, consolidándose como un eje estratégico para el desarrollo tecnológico en múltiples áreas del conocimiento. No obstante, al tratarse de una disciplina relativamente reciente, aún persisten incertidumbres significativas respecto a sus posibles efectos a mediano y largo plazo sobre el medio ambiente y la salud humana. En particular, la nanotecnología ambiental, orientada a la remediación de contaminantes en agua, suelo y aire, ha propuesto soluciones altamente innovadoras y eficientes. Sin embargo, la misma naturaleza fisicoquímica que confiere a los nanomateriales propiedades únicas, como su elevada área superficial, reactividad y capacidad de interacción específica, también puede asociarse con riesgos toxicológicos variables, dependientes del tipo de nanopartícula, su composición, tamaño, morfología y condiciones de exposición. Diversos estudios han documentado que ciertos nanomateriales pueden inducir efectos adversos tales como alteraciones genéticas, disrupción endocrina, bioacumulación en cadenas tróficas, liberación o transporte de metales pesados y toxicidad aguda o crónica en organismos vegetales y animales. Asimismo, los procesos de síntesis y funcionalización de estos materiales pueden generar subproductos y residuos potencialmente problemáticos, incluyendo polímeros de baja biodegradabilidad y desechos de sales metálicas. En este contexto, resulta necesario evaluar de manera integral el impacto ambiental asociado a cada etapa del ciclo de vida de las tecnologías basadas en nanomateriales, desde su producción hasta su disposición final. El presente trabajo compendia y analiza la evidencia disponible sobre los principales riesgos ambientales vinculados al desarrollo y aplicación de la nanotecnología.

Palabras clave: *Nanotecnología, ambiente, salud, tecnología.*

Abstract

Nanotechnology has undergone rapid expansion in recent decades, becoming a strategic driver of technological development across multiple scientific disciplines. However, as a relatively recent field, significant uncertainties remain regarding its medium- and long-term effects on both the environment and human health. Environmental nanotechnology focuses on the remediation of contaminants in water, soil, and air, offering highly innovative and efficient solutions. Nevertheless, the same physicochemical characteristics that provide nanomaterials with unique properties, such as high surface area, enhanced reactivity, and specific interaction capabilities, may also be associated with variable toxicological risks, depending on the type of nanoparticle, its composition, size, morphology, and exposure conditions. Several studies have reported that certain nanomaterials can induce adverse effects, including genetic alterations, endocrine disruption, bioaccumulation within trophic chains, mobilization or transport of heavy metals, and acute or chronic toxicity in plant and animal organisms. In addition, synthesis and functionalization

processes may generate potentially hazardous by-products and residues, such as poorly biodegradable polymers and metal salt waste. Therefore, a comprehensive assessment of the environmental impact associated with each stage of the life cycle of nanotechnology-based systems from production to final disposal is essential. This work compiles and analyzes current evidence regarding the principal environmental risks linked to the development and application of nanotechnology.

Keywords: *Nanotechnology, environment, health, technology.*

Introducción

La intensificación de los procesos de industrialización y urbanización, incluyendo actividades como transporte, manufactura, construcción, refinación petroquímica y minería, ha incrementado de manera significativa la presión sobre los recursos naturales y la generación de residuos peligrosos. Estos procesos contribuyen a la liberación sistemática de contaminantes en aire, agua y suelo, alterando los equilibrios biogeoquímicos y representando un riesgo directo para la salud humana y la estabilidad de los ecosistemas. En la atmósfera predominan gases tóxicos como los óxidos de nitrógeno y azufre, los óxidos de carbono, el ozono troposférico, el material particulado y diversos compuestos orgánicos volátiles. En suelos y cuerpos de agua se acumulan metales pesados, como plomo, arsénico, aluminio y cadmio, y más recientemente, contaminantes emergentes tales como pesticidas, fármacos, colorantes y retardantes de flama, los cuales pueden ingresar al organismo humano por inhalación, ingestión o absorción dérmica (Ibrahim et al., 2016; Li et al., 2020; Muñoz & Saquero, 2018).

Este panorama ha impulsado la demanda de tecnologías más eficientes, sostenibles y económicamente viables para la prevención, monitoreo y tratamiento de contaminantes, con

el objetivo de reducir impactos ambientales sin generar efectos secundarios significativos (Ike et al., 2018; Islam & Islam, 2025; Padil et al., 2018).

La nanotecnología y la nanociencia están desempeñando cada vez un papel más importante para aportar soluciones nuevas e innovadoras para una gran gama de desafíos ambientales, esto debido a que tienen un enorme potencial para proporcionar soluciones en los diferentes campos de remediación ambiental. Estas investigaciones se han ido incrementando en las últimas décadas y sus descubrimientos son tan bastos que han dado como resultado nuevos materiales revolucionarios llamados nanomateriales (NM) y nanopartículas (NPs) que poseen características y aplicaciones muy específicas (Huang et al., 2024; Ma et al., 2024; Usmani et al., 2017). Estos incluyen métodos mejorados para reducir la contaminación, el tratamiento del agua, la detección ambiental, la remediación y hacer que las fuentes de energía alternativas sean más rentables, amigables con el ambiente y sustentables (Beni & Jabbari, 2022; Kuhn et al., 2022; Prasad et al., 2025). Diversas aplicaciones han demostrado eficacia en procesos de descontaminación debido a su alta especificidad y selectividad funcional, como se muestra en la Figura 1.

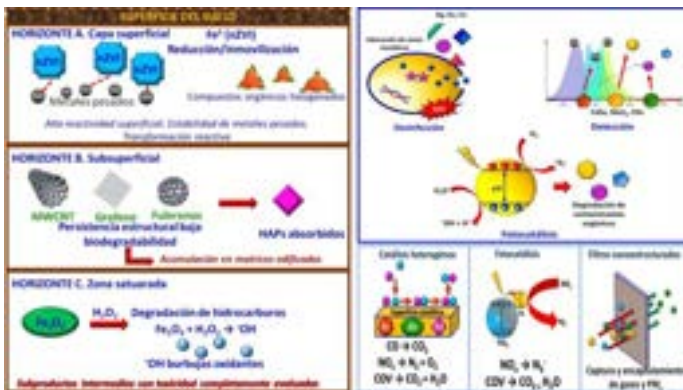


Figura 1. Usos típicos de la nanotecnología en los diferentes campos ambientales (Imagen realizada con software GIMP y power point; iconos obtenidos en <https://www.freepik.es/iconos>).

Sin embargo, el carácter innovador de estos materiales también introduce desafíos importantes. La síntesis y funcionalización de nanomateriales puede implicar el uso de reactivos potencialmente peligrosos y generar residuos con propiedades persistentes o de difícil degradación. Además, el comportamiento ambiental posterior a su liberación incluyendo procesos de transformación, transporte, acumulación y

posible interacción con organismos vivos aún no se comprende completamente (Ale et al., 2023; Garbovskiy, 2017; Gelaye, 2024). Existe preocupación respecto a que, bajo ciertas condiciones, algunos nanomateriales puedan transformarse o interactuar de manera que incrementen su reactividad o toxicidad, generando efectos no previstos en organismos y ecosistemas (Bao et al., 2023; Dwivedi et al., 2018; Zabeo et al., 2019).

Uso de nanotecnología y nanopartículas en el medio ambiente

Se realizó una revisión sistemática narrativa con enfoque cualitativo-comparativo orientada a evaluar la evidencia científica sobre nanotoxicidad asociada al uso de nanomateriales en remediación ambiental. El diseño metodológico se estructuró en cuatro ejes: (i) identificación de nanomateriales empleados en agua, suelo y aire; (ii) caracterización de mecanismos de acción tecnológica; (iii) análisis de mecanismos toxicológicos y ecotoxicológicos; y (iv) evaluación preliminar del impacto a lo largo del ciclo de vida. Se efectuó una búsqueda en bases de datos científicas indexadas priorizando artículos de revisión y estudios experimentales publicados principalmente entre 2020 y 2025, complementados con referencias anteriores cuando fueron fundamentales para el marco conceptual. Se emplearon combinaciones de palabras clave en inglés y español: “nanotoxicity”, “environmental nanotechnology”, “ecotoxicology of nanoparticles”, “life cycle assessment nanomaterials”, “ROS generation”, “ionic release”, “bioaccumulation”, “soil nanomaterials”, “aquatic toxicity nanoparticles” y “airborne nanoparticles risk” (Figura 2).

Los criterios de inclusión fueron:

1. Estudios experimentales in vitro, in vivo o ecotoxicológicos relacionados con nanomateriales aplicados a la remediación ambiental.
2. Revisiones críticas que aborden destino ambiental, transformación fisicoquímica o evaluación de riesgos.

3. Investigaciones que describen mecanismos de toxicidad (estrés oxidativo, genotoxicidad, inflamación, alteración microbiana).

Se excluyeron estudios enfocados exclusivamente en aplicaciones biomédicas sin vínculo ambiental directo. Los materiales identificados se agruparon según matriz ambiental de aplicación:

- Agua: nanopartículas metálicas (Ag, Au, Cu), óxidos semiconductores (TiO_2 , ZnO, Fe_2O_3 , CeO_2) y puntos cuánticos (CdSe, MoS_2 , CDs).
- Suelo: hierro de valencia cero (nZVI), magnetita (Fe_3O_4), nanotubos de carbono, grafeno y fullerenos.
- Aire: nanopartículas catalíticas (Pt, Pd, Rh), TiO_2 incorporado en materiales de construcción y filtros basados en grafeno/CNTs.

Se compararon reportes que incluyen aproximaciones de análisis de ciclo de vida (ACV) o evaluación de riesgo ambiental. La información recopilada se sistematizó en matrices comparativas que relacionaron: nanomaterial-aplicación-mecanismo-peligros. Se priorizó la identificación de patrones comunes, como correlaciones entre tamaño reducido y mayor reactividad biológica, o entre estabilidad coloidal y movilidad ambiental.

Se reconoce heterogeneidad en metodologías toxicológicas, variabilidad en condiciones experimentales y falta de estandarización en dosis y métricas (masa, número de partículas o

área superficial), lo que limita comparaciones directas. Asimismo, la escasez de estudios longitudinales dificulta inferencias sobre efectos crónicos.



Figura 2. Aplicaciones de la nanotecnología pero sus riesgos y consecuencias (Imagen realizada con software GIMP y power point; iconos obtenidos en <https://www.freepik.es/iconos>).

Riesgos a la salud humana y medio ambiente por el uso de nanopartículas y nanotecnologías

El análisis permitió identificar y clasificar los nanomateriales más utilizados en procesos de remediación ambiental en agua, suelo y aire, así como los posibles residuos generados desde su síntesis hasta su aplicación. Los resultados se estructuraron por matriz ambiental, especificando tipo de nanomaterial, función tecnológica y riesgos asociados (Figura 3).

Agua

El tratamiento de agua representa el campo con mayor desarrollo en nanotecnología ambiental. Se identificó el uso recurrente de nanopartículas metálicas de plata (Ag), oro (Au) y cobre (Cu), empleadas principalmente en procesos de desinfección debido a su actividad antimicrobiana y antifúngica, asociada a la liberación de iones metálicos y generación de especies reac-

tivas que afectan membranas celulares (Oh et al., 2018; Rosbero & Camacho, 2017). Asimismo, se reporta el uso de puntos cuánticos metálicos y carbonosos, tales como CdSe, MoS₂ y puntos cuánticos de carbono, en sistemas de detección de metales pesados y compuestos orgánicos. Su aplicación se fundamenta en sus propiedades ópticas y alta eficiencia de fluorescencia, que permiten detección selectiva y en tiempo real (Guo et al., 2017; Haldar et al., 2016; Zhong et al., 2018). En procesos de degradación de contaminantes orgánicos aromáticos, destacan los semiconductores como TiO₂, ZnO, Fe₂O₃ y CeO₂, utilizados en reacciones de oxidación avanzada mediante activación fotocatalítica. Estos materiales promueven la generación de radicales hidroxilos responsables de la mineralización parcial o total de contaminantes (Kefeni et al., 2017;

Youssef et al., 2018). No obstante, se documenta que su estabilidad coloidal, agregación y posible liberación iónica pueden modificar su perfil toxicológico en ambientes acuáticos.

Suelo

En la remediación de suelos contaminados se identificó el uso predominante de nanopartículas de hierro de valencia cero (nZVI), aplicadas en la estabilización y reducción de metales pesados, así como en la transformación reductiva de compuestos orgánicos halogenados. Su alta reactividad superficial permite la inmovilización de contaminantes, aunque su oxidación progresiva y movilidad en el subsuelo generan interrogantes sobre su destino ambiental (Kien A. Vu & Catherine N. Mulligan, 2023; Zhang et al., 2022). También se emplean nanomateriales carbonosos como nanotubos de carbono, grafeno y fullerenos, cuya elevada área superficial favorece procesos de adsorción de hidrocarburos aromáticos policíclicos y metales pesados (Gil-Díaz et al., 2022; Zhao et al., 2019). Sin embargo, su persistencia estructural y baja biodegradabilidad plantean posibles riesgos de acumulación en matrices edáficas. Adicionalmente, se reporta el uso de magnetita nanométrica combinada con agentes oxidantes para la degradación de hidrocarburos en suelos contaminados, aprovechando reacciones tipo Fenton heterogéneo. Estos sistemas pueden generar subproductos intermedios cuya toxicidad requiere evaluación adicional. (K. A. Vu & C. N. Mulligan, 2023).

Aire

En el control de contaminantes atmosféricos se identificó el desarrollo de catalizadores basados en nanopartículas metálicas de platino (Pt), rodio (Rh) y paladio (Pd), utilizados en la conversión catalítica de gases como CO, NOx y compuestos orgánicos volátiles. La reducción de tamaño a escala nanométrica incrementa el área activa y la eficiencia catalítica, prolongando su vida útil operativa (Le

et al., 2023; Wang et al., 2023). También se reporta la incorporación de grafeno y nanotubos de carbono en filtros inteligentes para la captura y encapsulamiento de gases y partículas finas, formando estructuras ultrafinas con alta capacidad de retención (Tucek et al., 2016; Wang et al., 2025). Incluso se ha llegado a promover la investigación del TiO₂ acoplado al cemento o a los vidrios para la limpieza del aire en carreteras o del aire en interiores (G. Mahy et al., 2018; Haghighi & Haghighat, 2024; Wei et al., 2023).

Residuos

En todas las categorías analizadas se identificó la generación de residuos asociados a la síntesis y funcionalización de nanopartículas. Estos incluyen sales metálicas residuales, agentes reductores, surfactantes, estabilizantes poliméricos y catalizadores ácidos o básicos. Dependiendo del método de producción, estos subproductos pueden presentar baja biodegradabilidad o requerir tratamientos especializados para su disposición final. El análisis integral permitió establecer que, aunque los nanomateriales presentan alta eficiencia en procesos de remediación, su comportamiento ambiental posterior incluyendo transformación, liberación iónica, agregación o interacción con organismos puede derivar en efectos ecotoxicológicos en plantas, microorganismos, fauna y potencialmente en seres humanos, como se sintetiza en la Tabla 1 y la Figura 3.

Tabla 1. Ejemplos del uso de nanotecnología y su impacto ambiental y salud humana

MATRIZ	NANOMATERIAL ESPECÍFICO	APLICACIÓN PRINCIPAL	MECANISMO DE ACCIÓN	POSIBLES EFECTOS AMBIENTALES Y EN SALUD	REF
AGUA	Nanopartículas de plata (Ag)	Desinfección antimicrobiana	Liberación de iones Ag ⁺ , daño a membranas celulares, generación de ROS	Toxicidad en organismos acuáticos, alteración de microbiota, bioacumulación, citotoxicidad	(Mat Lazim et al., 2023)
	Nanopartículas de oro (Au)	Desinfección y sensores	Interacción superficial y actividad catalítica	Potencial bioacumulación, efectos celulares dependientes de tamaño	(Nižnik et al., 2024)
	Nanopartículas de cobre (Cu/CuO)	Desinfección y degradación catalítica	Liberación de iones Cu ²⁺ , estrés oxidativo	Toxicidad acuática, daño branquial en peces, efectos genotóxicos	(Sielska & Skuza, 2025)
	Puntos cuánticos inorgánicos	Sensores de metales pesados	Fluorescencia dependiente de tamaño	Liberación de Cd ²⁺ , alta toxicidad, bioacumulación	(Q. Liu et al., 2022)
	Puntos cuánticos de carbono (CDs)	Detección y fotocatálisis	Emisión fluorescente, transferencia electrónica	Toxicidad variable, posible generación de ROS	(Xiang & Tan, 2022)
	TiO ₂	Fotocatálisis	Generación de radicales hidroxilos (•OH) bajo irradiación	Estrés oxidativo en organismos acuáticos, alteración celular	(Gatou et al., 2024)
	ZnO	Fotocatálisis y desinfección	Liberación de Zn ²⁺ , generación de ROS	Toxicidad en algas y peces, daño oxidativo	(Sharma et al., 2023)
	Fe ₂ O ₃	Procesos redox y adsorción	Transferencia electrónica	Posible acumulación en sedimentos	(Falciglia et al., 2022)
SUELO	Hierro de valencia cero (nZVI)	Reducción de metales pesados y compuestos halogenados	Reacciones reductivas superficiales	Movilidad en subsuelo, alteración microbiana, acumulación de óxidos	(Wu et al., 2024)
	Magnetita (Fe ₃ O ₄)	Fenton heterogéneo	Generación de radicales oxidantes	Formación de subproductos intermedios potencialmente tóxicos	(L. Liu et al., 2022)
	Nanotubos de carbono (CNTs)	Adsorción de contaminantes orgánicos	Alta área superficial, interacciones π-π	Persistencia, inflamación en organismos, bioacumulación	(Kim et al., 2024)
	Grafeno y óxido de grafeno	Adsorción y soporte catalítico	Interacción superficial y adsorción	Toxicidad en microorganismos del suelo, baja biodegradabilidad	(Das et al., 2023)
	Fullerenos	Captura de contaminantes orgánicos	Interacciones hidrofóbicas	Potencial transporte en agua subterránea, estrés oxidativo	(Hendricks et al., 2022)
AIRE	Pt (platino)	Conversión catalítica de CO y NOx	Catalizador heterogéneo	Liberación de partículas ultrafinas, riesgo inhalatorio	(Rajesh & Elumalai, 2025)
	Pd (paladio)	Conversión catalítica	Oxidación-reducción catalítica	Posible sensibilización respiratoria	(Samim, 2022)
	Rh (rodio)	Reducción de NOx	Actividad catalítica superficial	Riesgo por exposición ocupacional	(Kowalska et al., 2022)
	TiO ₂ incorporado en cemento/vidrio	Degradación fotocatalítica de NOx y COVs	Oxidación fotocatalítica superficial	Liberación de nanopartículas por desgaste	(Liu et al., 2025)
	Filtros con grafeno o CNTs	Captura de gases y partículas	Adsorción y encapsulamiento	Riesgo por liberación de fibras respirables	(Xu et al., 2022)

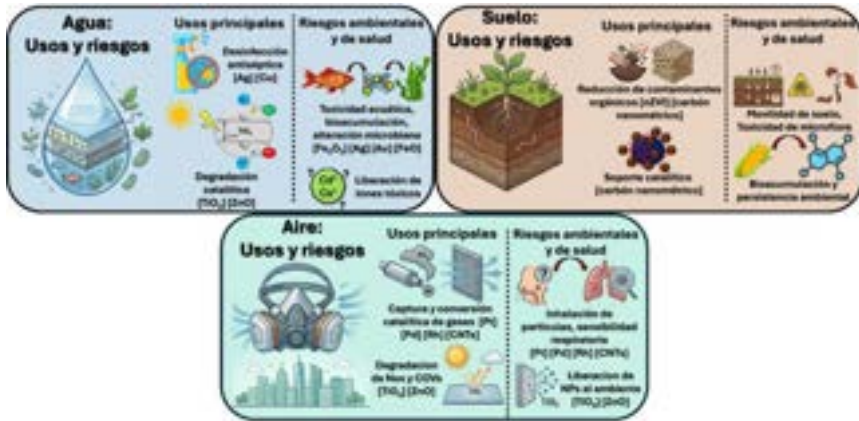


Figura 3. Nanopartículas usadas en los diferentes medios y sus efectos adversos (Imagen realizada con software GIMP y power point; iconos obtenidos en <https://www.freepik.es/iconos>).

Conclusiones

La nanotecnología ha consolidado un papel estratégico en el desarrollo de soluciones avanzadas para problemas energéticos, biomédicos e industriales, particularmente en el ámbito de la remediación ambiental. Sus propiedades fisicoquímicas diferenciadas, alta área superficial, reactividad controlada y capacidad de funcionalización han permitido diseñar materiales con elevada eficiencia en procesos de adsorción, degradación catalítica y detección selectiva de contaminantes. Sin embargo, el análisis realizado evidencia que estos beneficios tecnológicos no están exentos de implicaciones ambientales y sanitarias. A partir de la revisión presentada, se identificó que diversos nanomateriales utilizados en agua, suelo y aire pueden generar efectos adversos asociados a liberación iónica, generación de especies reactivas de oxígeno, persistencia estructural, bioacumulación y alteración de comunidades microbianas. Asimismo, la etapa de síntesis puede implicar el uso de precursores químicos reactivos, surfactantes y agentes estabilizantes que originan residuos de difícil tratamiento o disposición final. Esto indica que el impacto potencial no se limita a la fase de aplicación, sino que debe evaluarse a lo largo del ciclo de vida completo del material. La evidencia

también muestra que aún existen vacíos importantes en la comprensión del destino ambiental, transformación fisicoquímica y efectos crónicos a largo plazo de muchos nanomateriales. En este sentido, resulta indispensable fortalecer los estudios toxicológicos, ecotoxicológicos y de análisis de ciclo de vida, así como promover marcos regulatorios más específicos que establezcan criterios claros para su producción, uso y disposición. La estandarización de protocolos y la evaluación de riesgos basada en evidencia científica son elementos clave para garantizar un desarrollo responsable. Paralelamente, se observa un avance en estrategias de síntesis más sostenibles, particularmente aquellas alineadas con principios de química verde, que buscan sustituir reactivos corrosivos o tóxicos por extractos vegetales u otros agentes menos agresivos, y reducir condiciones extremas de presión y temperatura. Si bien estas alternativas no eliminan por completo los riesgos, representan una transición hacia modelos de producción con menor impacto ambiental.

En términos generales, la nanotecnología no debe entenderse únicamente como una promesa tecnológica ni como una amenaza potencial, sino

como una herramienta cuyo valor depende de su diseño, regulación y aplicación responsable. La investigación en este campo continúa siendo pertinente y necesaria, siempre que se desarrolle bajo criterios de seguridad, control ambiental

y responsabilidad ética. El desafío no radica en detener su avance, sino en integrar de manera sistemática la evaluación de riesgos y la sostenibilidad como componentes inseparables de la innovación científica.

Conflicto de intereses

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún conflicto de interés.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del escrito, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Descargo de Responsabilidad (Inteligencia Artificial) Los autores declaran por la presente que NO se han utilizado tecnologías de IA generativa, tales como modelos de lenguaje grandes (ChatGPT, COPILOT, etc.) y generadores de texto a imagen, durante la redacción o edición de este manuscrito.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Revista Digital Internacional de Divulgación Científica del Instituto de Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por dar a conocer las diversas temáticas que deben ser conocidas por los lectores. Cristian-B. Palacios-C. y Alan-J. Santiago-C. Agradecen a SECIHTI las becas doctorales en el Programa de Maestría y doctorado en ingeniería ambiental, UNAM (folio: 002591), otorgadas durante esta investigación.

GLOSARIO

Adsorción: Proceso fisicoquímico mediante el cual moléculas o iones se adhieren a la superficie de un material sólido, como ocurre en nanomateriales utilizados para capturar contaminantes en agua o suelo.

Agentes oxidantes: Sustancias capaces de aceptar electrones durante una reacción química, promoviendo la degradación de contaminantes mediante procesos de oxidación.

Agregación: Proceso por el cual nanopartículas individuales se agrupan formando estructuras de mayor tamaño, lo que puede modificar su movilidad y toxicidad ambiental.

Bioacumulación: Acumulación progresiva de una sustancia en un organismo cuando la tasa de absorción supera la de eliminación.

Catalizador heterogéneo: Material que acelera una reacción química sin consumirse, encontrándose en una fase distinta a la de los reactivos, como las nanopartículas metálicas en convertidores catalíticos.

Contaminantes emergentes: Sustancias recientemente detectadas en el ambiente, como fármacos, pesticidas o retardantes de flama, cuyos efectos a largo plazo aún se investigan.

Desinfección antimicrobiana: Eliminación o inactivación de microorganismos mediante agentes físicos o químicos, incluyendo nanopartículas metálicas con actividad biocida.

Disrupción endocrina: Alteración del sistema hormonal causada por sustancias químicas que interfieren con la síntesis, liberación o acción de hormonas.

Ecotoxicidad: Capacidad de una sustancia para generar efectos adversos en organismos y ecosistemas.

Estrés oxidativo: Desequilibrio entre la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) y la capacidad antioxidante de un sistema biológico, que puede provocar daño celular.

Fotocatálisis: Proceso en el cual un material semiconductor activado por luz promueve reacciones químicas, comúnmente utilizado para degradar contaminantes orgánicos.

Generación de radicales hidroxilo ($\cdot\text{OH}$): Formación de especies altamente reactivas capaces de oxidar compuestos orgánicos durante procesos de oxidación avanzada.

Hierro de valencia cero (nZVI): Nanopartículas de hierro metálico empleadas en la reducción y estabilización de contaminantes en suelos y aguas subterráneas.

Edáfica: Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo que influyen directamente en el crecimiento de las plantas, la distribución de organismos y la biodiversidad.

Liberación iónica: Proceso mediante el cual nanopartículas metálicas liberan iones al medio, lo que puede contribuir tanto a su efecto antimicrobiano como a su toxicidad.

Magnetita nanométrica (Fe_3O_4): Óxido de hierro con propiedades magnéticas utilizado en procesos de degradación catalítica y separación magnética.

Materia orgánica natural (NOM): Conjunto de compuestos orgánicos presentes en ambientes naturales que pueden interactuar con nanomateriales modificando su comportamiento.

Nanomaterial: Material con al menos una dimensión en el rango de 1 a 100 nanómetros que presenta propiedades fisicoquímicas distintas a las de su forma macroscópica.

Nanopartícula (NP): Partícula sólida en escala nanométrica con propiedades ópticas, electrónicas o catalíticas específicas.

Nanopartículas metálicas: Partículas nanométricas compuestas por metales como plata, oro, cobre, platino o paladio, utilizadas en desinfección y catálisis.

Nanomateriales carbonosos: Materiales basados en carbono a escala nanométrica, como nanotubos de carbono, grafeno y fullerenos, empleados en adsorción y soporte catalítico.

Óxidos metálicos semiconductores: Materiales como TiO_2 o ZnO que presentan propiedades electrónicas que permiten procesos fotocatalíticos.

Oxidación avanzada: conjunto de procesos que generan especies altamente reactivas para degradar contaminantes persistentes.

Persistencia ambiental: Capacidad de un material para permanecer en el ambiente sin degradarse durante periodos prolongados.

Puntos cuánticos: nanocristales semiconductores con propiedades ópticas dependientes de su tamaño, utilizados en sensores y aplicaciones fotónicas.

Reacciones tipo Fenton: procesos catalíticos que generan radicales oxidantes mediante la interacción de hierro y peróxidos.

Remediación ambiental: Conjunto de técnicas destinadas a eliminar, transformar o inmovilizar contaminantes en agua, suelo o aire.

Residuos de síntesis: Subproductos generados durante la fabricación de nanomateriales, como sales metálicas, surfactantes o agentes reductores.

Semiconductor: material cuya conductividad eléctrica puede modificarse mediante estímulos externos, fundamental en procesos fotocatalíticos.

Toxicidad dependiente del tamaño: Variación del efecto biológico de una nanopartícula en función de su dimensión, forma o área superficial.

Transformación ambiental: Cambios fisicoquímicos que experimentan los nanomateriales tras su liberación, incluyendo disolución, oxidación o modificación superficial.

Referencias

- Ale, A., Andrade, V. S., Gutiérrez, M. F., Bacchetta, C., Rossi, A. S., Orihuela, P. S., Desimone, M. F., & Cazenave, J. (2023). Nanotechnology-based pesticides: Environmental fate and ecotoxicity. *Toxicol Appl Pharmacol*, 471, 116560. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.taap.2023.116560>
- Bao, L., Cui, X., & Chen, C. (2023). Toxicology for Nanotechnology. In *Nanomedicine* (pp. 157-177). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-16-8984-0_9
- Beni, A. A., & Jabbari, H. (2022). Nanomaterials for Environmental Applications. *Results in Engineering*, 15, 100467. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100467>
- Das, P., Penton, C. R., Westerhoff, P., & Perreault, F. (2023). Prospects of 2D graphene nanomaterials in plant-based agriculture and their fate in terrestrial soil: a critical review. *Environmental Science: Nano*, 10(11), 2936-2956. DOI: <https://doi.org/10.1039/D3EN00511A>
- Dwivedi, S., Saquib, Q., Ahmad, B., Ansari, S. M., Azam, A., & Musarrat, J. (2018). Toxicogenomics: A new paradigm for nanotoxicity evaluation. In *Cellular and Molecular Toxicology of Nanoparticles* (pp. 143-161). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72041-8_9
- Falciglia, P. P., Gagliano, E., Scandura, P., Bianco, C., Tosco, T., Sethi, R., Varvaro, G., Agostinelli, E., Bongiorno, C., & Russo, A. (2022). Physico-magnetic properties and dynamics of magnetite (Fe₃O₄) nanoparticles (MNPs) under the effect of permanent magnetic fields in contaminated water treatment applications. *Separation and Purification Technology*, 296, 121342. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121342>
- G. Mahy, J., D. Lambert, S., Geens, J., Daniel, A., Wicky, D., Archambeau, C., & Heinrichs, B. (2018). Large scale production of photocatalytic TiO₂ coating for volatile organic compound (VOC) air remediation. *AIMS Materials Science*, 5(5), 945-956. DOI: <https://doi.org/10.3934/matricsci.2018.5.945>
- Garbovskiy, Y. (2017). Biological Contamination of Nanoparticles and Its Manifestation in Optical Absorbance Measurements. *Anal Chem*, 89(14), 7282-7285. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.7b01766>
- Gatou, M.-A., Syrrakou, A., Lagopati, N., & Pavlatou, E. A. (2024). Photocatalytic TiO₂-based nanostructures as a promising material for diverse environmental applications: a review. *Reactions*, 5(1), 135-194. DOI: <https://doi.org/10.3390/reactions5010007>
- Gelaye, Y. (2024). Application of nanotechnology in animal nutrition: Bibliographic review. *Cogent Food & Agriculture*, 10(1), 2290308. DOI: <https://doi.org/10.1080/23311932.2023.2290308>
- Gil-Diaz, M., Perez, R. A., Alonso, J., Miguel, E., Diez-Pascual, S., & Lobo, M. C. (2022). Iron nanoparticles to recover a co-contaminated soil with Cr and PCBs. *Sci Rep*, 12(1), 3541. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-07558-w>
- Guo, Y. M., Chen, Y. Z., Cao, F. P., Wang, L. J., Wang, Z., & Leng, Y. M. (2017). Hydrothermal synthesis of nitrogen and boron doped carbon quantum dots with yellow-green emission for sensing Cr(VI), anti-counterfeiting and cell imaging. *RSC advances*, 7(76), 48386-48393. DOI: <https://doi.org/10.1039/c7ra09785a>
- Haghighi, P., & Haghighat, F. (2024). TiO₂-based photocatalytic oxidation process for indoor air VOCs removal: A comprehensive review. *Building and Environment*, 249, 111108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111108>
- Haldar, D., Dinda, D., & Saha, S. K. (2016). High selectivity in water soluble MoS₂ quantum dots for sensing nitro explosives. *Journal of Materials Chemistry C*, 4(26), 6321-6326. DOI: <https://doi.org/10.1039/c6tc01811d>
- Hendricks, N., Olatunji, O. S., & Gumbi, B. P. (2022). Occurrence and risk assessment of fullerene colloidal nanoparticles by ultrasonic-assisted dispersive liquid-liquid extraction and high-performance liquid chromatography in surface waters. *Heliyon*, 8(11). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11454>
- Huang, X. C., Auffan, M., Eckelman, M. J., Elimelech, M., Kim, J. H., Rose, J., Zuo, K. C., Li, Q. L., & Alvarez, P. J. J. (2024). Trends, risks and opportunities in environmental nanotechnology. *Nature Reviews Earth & Environment*, 5(8), 572-587. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43017-024-00567-5>
- Ibrahim, R. K., Hayyan, M., AlSaadi, M. A., Hayyan, A., & Ibrahim, S. (2016). Environmental application of nanotechnology: air, soil, and water. *Environ Sci Pollut Res Int*, 23(14), 13754-13788. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6457-z>

- Ike, I. A., Linden, K. G., Orbell, J. D., & Duke, M. (2018). Critical review of the science and sustainability of persulphate advanced oxidation processes. *Chemical Engineering Journal*, 338, 651-669. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.01.034>
- Islam, F. A. S., & Islam, M. A. N. (2025). AI-Driven Integration of Nanotechnology and Green Nanotechnology for Sustainable Energy and Environmental Remediation. *Journal of Engineering Research and Reports*, 27(7), 260-311. DOI: <https://doi.org/10.9734/jerr/2025/v27i71574>
- Kefeni, K. K., Msagati, T. A. M., & Mamba, B. B. (2017). Ferrite nanoparticles: Synthesis, characterisation and applications in electronic device. *Materials Science and Engineering B-Advanced Functional Solid-State Materials*, 215, 37-55. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2016.11.002>
- Kim, M., Goerzen, D., Jena, P. V., Zeng, E., Pasquali, M., Meidl, R. A., & Heller, D. A. (2024). Human and environmental safety of carbon nanotubes across their life cycle. *Nature Reviews Materials*, 9(1), 63-81. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41578-023-00611-8>
- Kowalska, J., Biaduń, E., Kińska, K., Gniadek, M., & Krasnodębska-Ostrega, B. (2022). Tracking changes in rhodium nanoparticles in the environment, including their mobility and bioavailability in soil. *Science of the Total Environment*, 806, 151272. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151272>
- Kuhn, R., Bryant, I. M., Jensch, R., & Böllmann, J. (2022). Applications of Environmental Nanotechnologies in Remediation, Wastewater Treatment, Drinking Water Treatment, and Agriculture. *Applied Nano*, 3(1), 54-90. DOI: <https://doi.org/10.3390/applnano3010005>
- Le, P. H., Yamashita, S., Cao, K. L. A., Hirano, T., Tsonoji, N., Kautsar, D. B., & Ogi, T. (2023). CO Oxidation Enabled by Three-Way Catalysts Comprising Pd/Rh Nanoparticles Supported on AlO and CeZrO
- Confined in Macroporous Polystyrene Latex Templates. *ACS Applied Nano Materials*, 6(18), 17324-17335. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsanm.3c03954>
- Li, F., Chen, L., Chen, W., Bao, Y., Zheng, Y., Huang, B., Mu, Q., Wen, D., & Feng, C. (2020). Antibiotics in coastal water and sediments of the East China Sea: Distribution, ecological risk assessment and indicators screening. *Mar Pollut Bull*, 151, 110810. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110810>
- Liu, H., Wang, Y., Wang, X., Liu, R., & Zhang, P. (2025). TiO2 Nanoparticles in Soil: Adsorption, Transformation, and Environmental Risks. *Powders*, 4(4), 28. DOI: <https://doi.org/10.3390/powders4040028>
- Liu, L., Zhang, Q., Gui, J., Zhang, B., Yang, H., Lu, D., Chen, Z., Liu, Q., Li, Z., & Jiang, G. (2022). Traffic-derived magnetite pollution in soils along a highway on the Tibetan Plateau. *Environmental Science: Nano*, 9(2), 621-631. DOI: <https://doi.org/10.1039/D1EN00886B>
- Liu, Q., Ding, X., Pang, Y., Cao, Y., Lei, J., Wu, J., & Zhang, T. (2022). New insights into the safety assessment of quantum dots: potential release pathways, environmental transformations, and health risks. *Environmental Science: Nano*, 9(9), 3277-3311. DOI: <https://doi.org/10.1039/D2EN00252C>
- Ma, X., Tian, Y., Yang, R., Wang, H., Allahou, L. W., Chang, J., Williams, G., Knowles, J. C., & Poma, A. (2024). Nanotechnology in healthcare, and its safety and environmental risks. *J Nanobiotechnology*, 22(1), 715. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12951-024-02901-x>
- Mat Lazim, Z., Salmiati, S., Marpongahtun, M., Arman, N. Z., Mohd Haniffah, M. R., Azman, S., Yong, E. L., & Salim, M. R. (2023). Distribution of silver (Ag) and silver nanoparticles (AgNPs) in aquatic environment. *Water*, 15(7), 1349. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15071349>
- Muñoz, R. V., & Saquero, A. H. J. M. N. R. I. e. N. y. N. (2018). Toxicidad de los nanomateriales de interés biomédico en los sistemas biológicos. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 11(20), 65-75. DOI: <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2018.20.62715>
- Niżnik, Ł., Noga, M., Kobylarz, D., Frydrych, A., Krośniak, A., Kapka-Skrzypczak, L., & Juroski, K. (2024). Gold nanoparticles (AuNPs)—toxicity, safety and green synthesis: a critical review. *International journal of molecular sciences*, 25(7), 4057. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms25074057>
- Oh, E., Delehanty, J. B., Klug, C. A., Susumu, K., Russ Algar, W., Goswami, R., & Medintz, I. L. (2018). Utility of PEGylated dithiolane ligands for direct synthesis of water-soluble Au, Ag, Pt, Pd, Cu and AuPt nanoparticles. *Chem Commun (Camb)*, 54(16), 1956-1959. DOI: <https://doi.org/10.1039/c7cc08650d>

- Padil, V. V. T., Wacławek, S., Cernik, M., & Varma, R. S. (2018). Tree gum-based renewable materials: Sustainable applications in nanotechnology, biomedical and environmental fields. *Biotechnol Adv*, 36(7), 1984-2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.08.008>
- Prasad, R. D., Prasad, N. R., Prasad, N., Prasad, R. S., Prasad, S. R., Shrivastav, O. P., Prasad, R. B., Prasad, R. A., Prasad, R. G., Saxena, P., Prasad, R. R., Saxena, U. R., Gour, M., Shaikh, Y. I., Ali, M. S., Algadi, H., & Guo, X. (2025). A Review on Aspects of Nanotechnology in Environmental Science and Engineering. *ES General*, 7, 1397. DOI: <https://doi.org/10.30919/esg1397>
- Rajesh, M. V., & Elumalai, K. (2025). Comprehensive Review of Platinum Nanoparticles: Properties, Applications, and Toxicological Considerations. *Biomedical Materials & Devices*, 1-23. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44174-025-00376-4>
- Rosbero, T. M. S., & Camacho, D. H. (2017). Green preparation and characterization of tentacle-like silver/copper nanoparticles for catalytic degradation of toxic chlorpyrifos in water. *Journal of environmental chemical engineering*, 5(3), 2524-2532. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.05.009>
- Samim, M. (2022). Palladium nanoparticles as emerging pollutants from motor vehicles: An in-depth review on distribution, uptake and toxicological effects in occupational and living environment. *Science of the Total Environment*, 823, 153787. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153787>
- Sharma, R., Watanabe, T., & Kumar, A. (2023). Estimation of risk to soil and human health during irrigation using ZnO nanoparticles-containing water. *Journal of environmental chemical engineering*, 11(6), 111230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111230>
- Sielska, A., & Skuza, L. (2025). Copper nanoparticles in aquatic environment: release routes and oxidative stress-mediated mechanisms of toxicity to fish in various life stages and future risks. *Current Issues in Molecular Biology*, 47(6), 472. DOI: <https://doi.org/10.3390/cimb47060472>
- Tucek, J., Sofer, Z., Bousa, D., Pumera, M., Hola, K., Mala, A., Polakova, K., Havrdova, M., Cepe, K., Tomanec, O., & Zboril, R. (2016). Air-stable superparamagnetic metal nanoparticles entrapped in graphene oxide matrix. *Nat Commun*, 7, 12879. DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms12879>
- Usmani, M., Khan, I., Bhat, A., Pillai, R., Ahmad, N., Haafiz, M., & Oves, M. (2017). Current Trend in the Application of Nanoparticles for Waste Water Treatment and Purification: A Review. *Current Organic Synthesis*, 14(2), 206-226. DOI: <https://doi.org/10.2174/1570179413666160928125328>
- Vu, K. A., & Mulligan, C. N. (2023). Remediation of oil-contaminated soil using Fe/Cu nanoparticles and biosurfactants. *Environ Technol*, 44(22), 3446-3458. DOI: <https://doi.org/10.1080/09593330.2022.2061381>
- Vu, K. A., & Mulligan, C. N. (2023). Remediation of organic contaminated soil by Fe-based nanoparticles and surfactants: a review. *Environmental Technology Reviews*, 12(1), 60-82. DOI: <https://doi.org/10.1080/071622515.2023.2177200>
- Wang, K., Huang, K., Wang, Z., An, G., Zhang, M., Liu, W., Fu, S., Guo, H., Zhang, B., Lian, C., Wu, J., & Wang, L. (2025). Functional Group Engineering of Single-Walled Carbon Nanotubes for Anchoring Copper Nanoparticles Toward Selective CO(2) Electroreduction to C(2) Products. *Small*, 21(21), e2502733. DOI: <https://doi.org/10.1002/smll.202502733>
- Wang, Q. H., Liang, H. J., Zhou, J. W., Wang, J. K., Ye, Z., Zhao, M., Yang, H. M., Song, Y. H., & Guo, J. J. (2023). Boosting oxygen reduction catalysis by introducing Fe bridging atoms between Pt nanoparticles and N-doped graphene. *Chemical Engineering Journal*, 467, 143482. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.143482>
- Wei, Y. C., Meng, H., Wu, Q., Bai, X. Y., & Zhang, Y. Q. (2023). TiO₂-Based Photocatalytic Building Material for Air Purification in Sustainable and Low-Carbon Cities: A Review. *Catalysts*, 13(12), 1466. DOI: <https://doi.org/10.3390/catal13121466>
- Wu, Q., Sun, Y., Luo, Z., Li, X., Wen, Y., Shi, Y., Wu, X., Huang, X., Zhu, Y., & Huang, C. (2024). Application and development of zero-valent iron (ZVI)-based materials for environmental remediation: A scientometric and visualization analysis. *Environmental Research*, 241, 117659. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117659>
- Xiang, S., & Tan, M. (2022). Carbon dots derived from natural sources and their biological and environmental impacts. *Environmental Science: Nano*, 9(9), 3206-3225. DOI: <https://doi.org/10.1039/D2EN00435F>

- Xu, Z., Long, X., Jia, Y., Zhao, D., & Pan, X. (2022). Occurrence, transport, and toxicity of nanomaterials in soil ecosystems: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(6), 3943-3969. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01507-9>
- Youssef, Z., Colombeau, L., Yesmurzayeva, N., Baros, F., Vanderesse, R., Hamieh, T., Toufaily, J., Frochot, C., Roques-Carmes, T., & Acherar, S. (2018). Dye-sensitized nanoparticles for heterogeneous photocatalysis: Cases studies with TiO₂, ZnO, fullerene and graphene for water purification. *Dyes and Pigments*, 159, 49-71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2018.06.002>
- Zabeo, A., Keisler, J. M., Hristozov, D., Marcomini, A., & Linkov, I. (2019). Value of information analysis for assessing risks and benefits of nanotechnology innovation. *Environmental Sciences Europe*, 31(1), 11. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12302-019-0194-0>
- Zhang, S., Yi, K., Chen, A., Shao, J., Peng, L., & Luo, S. (2022). Toxicity of zero-valent iron nanoparticles to soil organisms and the associated defense mechanisms: a review. *Ecotoxicology*, 31(6), 873-883. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10646-022-02565-z>
- Zhao, L. Q., Yang, S. T., Yilihamu, A., & Wu, D. Y. (2019). Advances in the applications of graphene adsorbents: from water treatment to soil remediation. *Reviews in Inorganic Chemistry*, 39(1), 47-76. DOI: <https://doi.org/10.1515/revic-2018-0020>
- Zhong, D. L., Liu, W. W., Tan, P. F., Zhu, A. Q., Liu, Y., Xiong, X., & Pan, J. (2018). Insights into the synergy effect of anisotropic {001} and {230} facets of BaTiO₃ nanocubes sensitized with CdSe quantum dots for photocatalytic water reduction. *Applied Catalysis B-Environmental*, 227, 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.01.009>

Recepción: 10.03.2026

Revisión: 31.03.2026

Publicación: 08.05.2026

<https://orcid.org/0009-0000-4431-1781>

<https://orcid.org/0009-0003-2348-6613>

<https://orcid.org/0000-0003-2378-3338>

<https://orcid.org/0000-0003-0078-7221>

MORFOLOGÍA, PROPAGACIÓN Y DESARROLLO VEGETATIVO DEL CAMOTE (IPOMOEA BATATAS L.) EN ATLIXCO, PUEBLA

MORPHOLOGY, PROPAGATION, AND VEGETATIVE DEVELOPMENT OF SWEET POTATO (IPOMOEA BATATAS L.) IN ATLIXCO, PUEBLA

Olga Solórzano-Velázquez¹

Luis Uriel Torija-Peralta¹

David Martínez-Moreno¹

Jenaro Reyes-Matamoros^{2*}

¹Facultad de Ciencias Biológicas. Blvd. Valsequillo y Av. San Claudio,
Edificio 112-A, Col. San Manuel, CU, C.P. 72570, Puebla, Pue., México

^{2*}Centro de Investigación en Ciencias Agrícolas, Instituto de Ciencias
(ICUAP), Av. 14 Sur 6301, Col. San Manuel, CU, C.P. 72570, Puebla, Pue.,
México

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP)

Correos:

olga.solorzano@alumno.buap.mx

luis.torijap@alumno.buap.mx

david.martinez@correo.buap.mx

jenaro.reyes@correo.buap.mx

Resumen

El camote (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) es un cultivo neotropical de relevancia cultural, nutricional y agronómica, cuya plasticidad fenotípica lo posiciona como un recurso estratégico para la seguridad alimentaria. Estudios previos han descrito escalas fenológicas entre variaciones genotípicas de *Ipomoea batatas* y han señalado que la tuberización y la floración dependen de factores como el fotoperiodo, la temperatura, el tipo de suelo y el riego. Comprender los patrones de desarrollo locales resulta fundamental para optimizar el manejo agronómico y el mejoramiento genético frente al cambio climático. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo caracterizar las etapas fenológicas y los rasgos morfológicos de tres variedades de camote (blanco, morado y amarillo) cultivadas en San Félix Hidalgo, Atlixco, Puebla, México. El estudio se realizó en condiciones de campo mediante propagación vegetativa. Se establecieron dos cultivos en diferentes periodos vegetativos: uno en primavera-verano y otro en otoño-invierno. Durante cada ciclo se efectuó un seguimiento fenológico y una descripción morfológica. Los resultados mostraron que las variedades blanca y morada presentaron un desarrollo fenológico similar, mientras que el camote amarillo evidenció una marcada sensibilidad a la época de siembra, con un crecimiento vegetativo y una formación de tubérculos más favorables en primavera-verano que en otoño-invierno. En conjunto, los resultados confirman la alta plasticidad fenotípica de *Ipomoea batatas* y subrayan la importancia del periodo de establecimiento y de la propagación vegetativa para optimizar el manejo agronómico y la productividad del cultivo.

Palabras clave: *Convolvulaceae, fenología, raíz tuberosa, periodo vegetativo, propagación vegetativa.*

Abstract

Sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) is a neotropical crop of great cultural, nutritional, and agronomic importance, whose phenotypic plasticity makes it a strategic resource for food security. Previous studies have described phenological scales across genotypes of *Ipomoea batatas* and indicate that tuberization and flowering depend on factors such as photoperiod, temperature, soil conditions, and irrigation. Understanding its local developmental patterns is crucial for optimizing agronomic management and genetic improvement under climate change scenarios. Accordingly, this study aimed to characterize the phenological stages and morphological traits of three sweet potato varieties (white, purple, and yellow) cultivated in San Félix Hidalgo, Atlixco, Puebla, Mexico. The research was conducted under field conditions using vegetative propagation. Two crops were established in distinct growing seasons: one during spring-summer and the other during autumn-winter. Phenological monitoring and morphological descriptions were performed throughout each cycle. The results demonstrated that the white and purple varieties exhibited similar phenological

development, while the yellow sweet potato displayed pronounced sensitivity to the planting season. More favorable vegetative growth and tuber formation were observed during the spring-summer cycle compared to the autumn-winter period. Collectively, these findings confirm the high phenotypic plasticity of *Ipomea batatas* and emphasize the significance of the establishment period and vegetative propagation in optimizing agronomic management and crop productivity.

Keywords: *Convolvulaceae, phenology, tuberous root, vegetative period, vegetative propagation.*

Introducción

La especie *Ipomoea batatas* (L.) Lam., comúnmente conocida como camote o batata, pertenece al reino Plantae y a la división Tracheophyta, que agrupa a las plantas vasculares. Se clasifica dentro de las angiospermas, específicamente en la clase Magnoliopsida (dicotiledóneas), subclase Asteridae y orden Solanales. Su familia, Convolvulaceae, integra alrededor de 40 géneros y más de 1500 especies caracterizadas por su hábito trepador y flores acampanadas (Carranza, 2007). En esta familia, el camote se incluye en la tribu Ipomoeae y en el género *Ipomoea*, que abarca especies silvestres, ornamentales y cultivadas.

Más allá de su taxonomía, *Ipomoea batatas* es una planta de gran relevancia histórica, cultural y agronómica. Originaria de la región neotropical y domesticada hace más de 5.000 años, probablemente entre la península de Yucatán y la cuenca del Orinoco, se difundió ampliamente por América antes del contacto europeo (Roullier et al., 2013). Su importancia cultural se refleja en la diversidad de nombres que recibe en lenguas indígenas mexicanas, desde camotli en náhuatl hasta is iz en maya y tzatsúco-manta en totonaco (Martínez, 1979). En la gastronomía mexicana, constituye un alimento tradicional de alto valor energético y nutricional (UNAM, 2020).

Desde el punto de vista fisiológico, el camote presenta metabolismo fotosintético C3, fijando CO₂ inicialmente en un compuesto de tres carbonos. Aunque este tipo de metabolismo es menos eficiente a altas temperaturas, la especie posee adaptaciones morfológicas y fisiológicas, como un sistema radicular engrosado para almacenar carbohidratos y agua, que le permiten prosperar en climas tropicales y subtropicales, incluso en suelos pobres (Taiz et al., 2015; Woolfe, 1992). Gracias a su plasticidad fenotípica, su alto contenido nutricional y su tolerancia al estrés, *I. batatas* se considera un cultivo estratégico para la seguridad alimentaria y la agricultura sostenible, especialmente en escenarios de cambio climático (Lebot, 2009). En los últimos años, la inves-

tigación fenológica sobre *I. batatas* ha cobrado gran relevancia debido a su impacto directo en la productividad, la calidad del órgano de reserva y la adaptación a diversos ambientes. Estudios recientes han descrito con mayor precisión las etapas fenológicas de la especie y su variación entre genotipos, lo que ha permitido establecer escalas comparables y mejorar el modelado de crecimiento (Reyes et al., 2020). En este contexto, el análisis fenológico de *Ipomoea batatas*, sustentado en evidencia científica reciente, resulta esencial para comprender los patrones de crecimiento y desarrollo de la especie, así como para fortalecer el mejoramiento genético, optimizar el manejo agronómico y diseñar estrategias de adaptación al cambio climático. El estudio detallado de sus etapas de desarrollo permite no solo profundizar en su biología, sino también aprovechar de manera más eficiente su potencial como cultivo resiliente, nutritivo y de gran relevancia cultural. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo caracterizar las etapas fenológicas y los rasgos morfológicos de tres variedades de camote (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) cultivadas en la localidad de San Félix Hidalgo, Atlixco, Puebla, México.

Desarrollo

El estudio se realizó en San Félix Hidalgo, Atlixco, Puebla (18°54'19" N; 98°24'14" O; 1844 msnm), en una parcela agrícola de un cuarto de hectárea. Previo a la cosecha, el terreno fue preparado mediante labores de barbecho para eliminar malezas, así como rastreo y surcado, manteniendo una separación de 70 cm entre cada surco. Se evaluaron las variedades de camote blanco, morado y amarillo, establecidas a partir de guías vegetativas provenientes de semilleros locales en los periodos primavera-verano y otoño-invierno. El cuidado del cultivo incluyó la realización de tres limpiezas durante el ciclo agrícola, realizadas de manera manual y mecánica, destinadas al control de malezas y a la reducción de la competencia por agua, luz y nutrientes. Asimismo, se aplicó una fertilización inicial con

urea durante las primeras labores de limpieza, con el fin de estimular el crecimiento vegetativo en las etapas tempranas del cultivo.

El seguimiento fenológico se realizó mediante observaciones periódicas, en las que se registró la presencia o ausencia de los distintos órganos vegetales en cada variedad a lo largo de su período de desarrollo. De manera complementaria, se realizó una descripción

morfológica detallada de las estructuras que conforman el cultivo de camote, abarcando desde el sistema radicular hasta las estructuras reproductivas. Finalmente, se documentaron las diferentes formas de propagación del cultivo, tanto sexuales como asexuales, así como las principales limitaciones asociadas a cada una de ellas. La información obtenida se organizó y se presentó en forma de gráfico mediante el software RStudio.

Lo que descubrimos

A lo largo del ciclo primavera verano, el camote blanco registró un crecimiento continuo, por la presencia de hojas nuevas y maduras, así como por las inflorescencias, botones flora-

les, ramas primarias y secundarias. A partir de agosto, empezaron a formarse los tubérculos, proceso que siguió casi todo el ciclo hasta la cosecha (Figura 1).

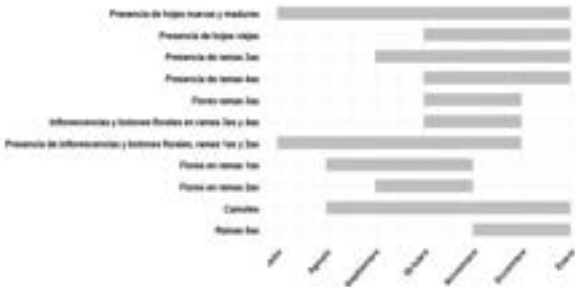


Figura 1. Fenología del camote blanco.

El camote morado tuvo un mayor desarrollo vegetativo de las hojas nuevas y maduras, así como de las ramas del eje principal, ramas primarias y secundarias. Los tubérculos comenzaron a formarse a

partir de agosto y continuaron creciendo hasta la cosecha, lo que muestra que la planta asigno sus recursos de manera equilibrada entre crecer y almacenar nutrientes en las raíces (Figura 2).

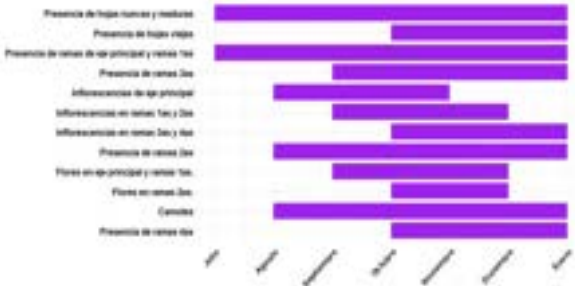


Figura 2. Fenología del camote morado

Durante el ciclo primavera-verano el camote amarillo mostró un desarrollo vegetativo similar al del camote morado, presentando hojas nuevas y maduras, ramas del eje principal, ramas primarias y secundarias durante la mayor parte del ciclo. El crecimiento del tubérculo también se inició a

principios de agosto y continuó hasta el día de la cosecha. Estos resultados sugieren que las condiciones ambientales de estas estaciones favorecieron la acumulación de reservas en las raíces, lo que condujo a un desarrollo más eficiente de la parte comestible de la planta (Figura 3).

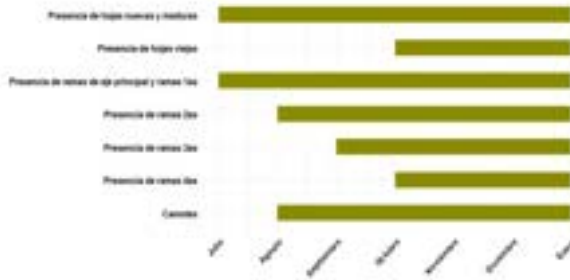


Figura 3. Fenología del camote amarillo (ciclo primavera-verano).

Por último, para el caso del camote amarillo cultivado en el ciclo otoño-invierno, tanto el desarrollo vegetativo, como la formación del tubérculo fue un proceso más tardío. La presencia de hojas nuevas y maduras, las ramas del eje principal y las ramas

primarias se iniciaron a principios de diciembre, mientras que el tubérculo se retrasó hasta el mes de marzo, por lo que la formación de camotes tuvo una menor duración, debido posiblemente a las bajas temperaturas de la temporada (Figura 4).

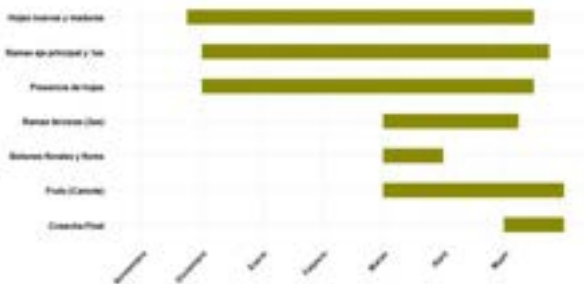


Figura 4. Fenológica del camote amarillo (ciclo otoño-invierno).

Desarrollo vegetativo de las plantas

El desarrollo del camote ocurre en varias etapas consecutivas. Inicia con la siembra de esquejes con 4 a 6 yemas, separando las plantas de 20 a 30 cm. Posteriormente comienza el desarrollo radicular y emergen las primeras hojas. El crecimiento vegetativo ocurre por la expansión del tallo y las hojas, alcanzando hasta un 90% de la cobertura

foliar, Durante este proceso se requiere de un control de malezas y fertilización (Martínez-Moreno *et al.*, 2020). El inicio de la floración, así como el surgimiento de frutos, comienza de los 60 a los 90 días después de la siembra, con frutos capsulares de 1-4 semillas (Martínez-Moreno *et al.*, 2018). En etapas avanzadas, la planta asigna la mayor parte

de sus recursos al engrosamiento de las raíces que forman los tubérculos, proceso que se conoce como tuberización (Reyes-Matamoros *et al.*, 2020). Finalmente, los tubérculos maduran, alcanzando un tamaño óptimo para su cosecha (Figura 5).



Figura 5. Desarrollo vegetativo de camote en campo (Imagen generada por ChatGPT, versión 4.5, OpenAI, 2025).

Morfología de la planta

La Figura 6 ilustra las principales estructuras que componen la planta de camote. Bajo tierra se encuentran las raíces tuberosas, responsables del almacenamiento de almidón y otros nutrientes. En la superficie, se desarrolla la biomasa formada por tallos rastreros de los cuales crecen hojas, cuya función principal es la fotosíntesis.

Asimismo, en la etapa de floración emergen flores que intervienen en la reproducción sexual de la especie y presentan una gama de colores que va del blanco al violeta.

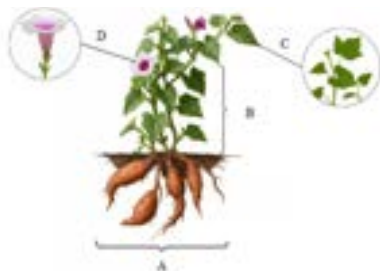


Figura 5. Desarrollo vegetativo de camote en campo (Imagen generada por ChatGPT, versión 4.5, OpenAI, 2025).

Raíz. El camote presenta un sistema radicular profundo y compuesto por raíces adventicias, de las cuales algunas engrosan hasta formar

un tubérculo, que se consume como alimento. Estas raíces cumplen una función de reserva energética, ya que albergan una gran cantidad de almidón y azúcares (Esquivel & Velázquez, 2014).

Las raíces tuberosas brotan de los nudos subterráneos del tallo. Pueden alcanzar un tamaño considerable, con una longitud de entre 30 y 40 cm y un diámetro de entre 15 y 20 cm. Su color es muy variable, con la pulpa y la cáscara mostrando tonos que van desde el blanco y el amarillo hasta el morado (Aguilar, 2021).

Tallo. El tallo del camote es cilíndrico, rastrero y de consistencia herbácea. Su longitud y grosor varían según la variedad y los nutrientes disponibles, y pueden medir desde unos pocos centímetros hasta varios metros. Este tallo presenta yemas axilares y terminales, lo que facilita su propagación vegetativa (Aguilar, 2021). La superficie del tallo puede ser lisa o presentar vellosidades, con colores que van del verde al morado o al rojizo (Esquivel & Velázquez, 2014).

Hojas. Las hojas del camote son simples y crecen de manera alternada, con disposición en espiral. Presentan una morfología muy variada, pudiendo ser enteras, lobuladas o dentadas, y con dimensiones que oscilan entre 4 y 20 cm. Además de su papel en la fotosíntesis, las hojas se aprovechan como forraje debido a su contenido en proteínas y vitaminas (Esquivel & Velázquez, 2014).

Flores y frutos. Las flores se presentan en inflorescencias tipo racimo, con un raquis de hasta 20 cm, y poseen una corola en forma de embudo, de colores que van del blanco al violeta intenso (Esquivel & Velázquez, 2014). El androceo está formado por cinco estambres y el gineceo por un ovario súpero bilocular (Aguilar, 2021).

El fruto se presenta en forma de cápsula esférica pequeña, de 3 a 7 mm, que, al madurar, adquiere una tonalidad parda (Figura 7). Cada fruto contiene de una a cuatro semillas pequeñas, de color negro o marrón, de forma globosa y con tegumento duro, lo cual dificulta la germinación (Esquivel & Velázquez, 2014).

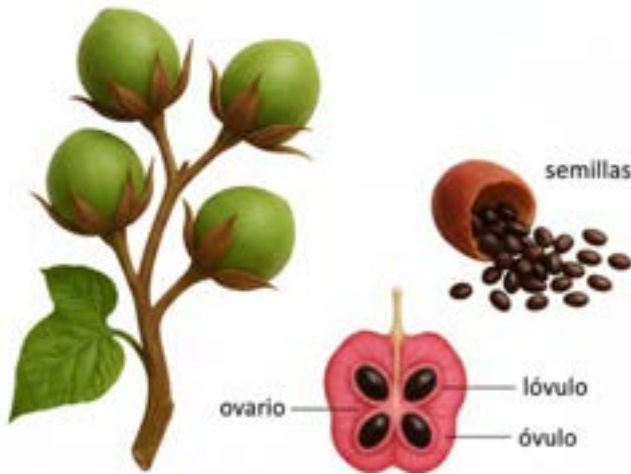


Figura 7. Fruto capsular y semillas de camote (Imagen generada por ChatGPT, versión 4.5, OpenAI, 2025).

La propagación del camote

El camote es un cultivo de importancia económica y alimentaria. Su propagación puede realizarse de forma asexual, mediante esquejes de tallo, o de forma sexual, mediante semillas botánicas, siendo la primera más común por su simplicidad y preservación de características genéticas (Martínez-Moreno *et al.*, 2020).

Propagación vegetativa. Es el método predominante, ya que asegura la uniformidad genética de las variedades. Se utilizan esquejes de tallo, preferentemente apicales o preapicales, de plantas madre de unos tres meses, con una longitud de 20 a 30 cm y 4 a 6 yemas viables (Martínez-Moreno *et al.*, 2020).

Este método requiere suelos bien preparados, con caballones de 1 m de ancho y 0,5 m de altura, con 0,3 m entre plantas y 1 m entre surcos, lo que asegura un desarrollo radicular óptimo (Martínez-Moreno *et al.*, 2020).

Propagación sexual. Ocurre en las flores mediante la polinización cruzada, formando frutos capsulares con pocas semillas. En el

cultivo de camote esta vía es limitada, por lo que, para su producción en campo domina la propagación vegetativa.

Germinación y factores asociados. La germinación de las semillas es lenta (15-30 días) debido a la dureza de la testa. Los factores que favorecen la germinación incluyen la escarificación (lijado o ácido sulfúrico diluido), la hidratación (remojo en agua tibia de 24 a 48 h), las temperaturas de 25 a 30 °C y los suelos aireados con alta materia orgánica. La luz no es esencial, pero su exposición indirecta puede mejorar el desarrollo de las plántulas (Lebot, 2009).

Limitaciones de la propagación por semilla. El uso de semillas en la agricultura se ve limitado por la heterogeneidad genética de las plántulas, que dificulta la uniformidad del cultivo, en comparación con la propagación vegetativa (Lebot, 2009). Por ello, esta técnica se reserva para investigaciones en programas de mejoramiento genético donde se induce variación genotípica, lo que permite seleccionar plantas con características deseadas.

Conflicto de intereses

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia. Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Descargo de responsabilidad (Inteligencia Artificial) Los autores declaran por la presente que NO se han utilizado tecnologías de IA generativa, tales como modelos de lenguaje grandes (ChatGPT, COPILOT, etc.) y generadores de texto a imagen, durante la redacción o edición de este manuscrito.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Facultad de Ciencias Biológicas y al Instituto de Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Referencias

- Aguilar Brenes, E. (2021). Manual del cultivo de camote (Ipomoea batatas). Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA).
- Austin, D.F. (1982). Convolvulaceae. In *Flora Neotropica* (Vol. 15). New York Botanical Garden Press.
- Carranza, E. (2007). Flora del bajo y de regiones adyacente: Familia Convolvulaceae. Fascículo 151, Instituto de Ecología A.C., México. <https://doi.org/10.21829/fb.97.2007.151>
- Esquivel Cobos, M.H., & Velázquez Meléndez, L.M. (2014). Evaluación de la elaboración de harina de camote morado (Ipomoea batatas Lam) producido bajo diferentes niveles de fertilización orgánica en el municipio de Othón P. Blanco. Instituto Tecnológico de la Zona Maya.
- Fundación UNAM. (2020). La UNAM te explica los beneficios del camote. <https://www.fundacionunam.org.mx/unam-al-dia/la-unam-te-explica-los-beneficios-del-camote/>
- Lebot, V. (2009). Tropical root and tuber crops: Cassava, sweet potato, yams and aroids. CABI.
- Martínez, M. (1979). Catálogo de nombres vulgares y científicos de plantas mexicanas. Fondo de Cultura Económica. México, 1220 p.
- Martínez-Moreno, D., Reyes-Matamoros, J., Andrés-Hernández, A. R., & Rivas-Arancibia, S. P. (2020). Desarrollo de variedades de camote morado bajo la óptica de plasticidad fenotípica. RD-ICUAP, 6(18), 17-25. <https://doi.org/10.32399/icuap.rdic.2448-5829.2020.18.216>
- OpenAI. (2025). ChatGPT (versión 4.5), Modelo de generación de imágenes. <https://chatgpt.com/>
- Reyes, M., J., Martínez, M., D. y Andrés, H., A.R. 2024. Análisis fenológico y uso de recursos en cultivares de camote amarillo (Ipomoea batatas L.) en San Félix Hidalgo, Atlixco, Puebla. Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias, 14(35): 29-38.
- Reyes, M., J., Martínez, M., D. y Nikolaenko, I.V. 2019. Estudio fenológico de variedades de camote en Atlixco, Puebla. Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias, 10(26): 16-30.
- Reyes-Matamoros, J., Martínez-Moreno, D., Andrés-Hernández, A.R., & Rivas-Arancibia, S.P. (2020). Asignación de recursos genéticos al camote morado de distinto origen en Atlixco, Puebla. RD-ICUAP, 6(18), 163-174.
- Roullier, C., Duputié, A., Wennekes, P., Benoit, L., Fernández Bringas, V. M., Rossel, G., ... & McKey, D. (2013). Disentangling the origins of cultivated sweet potato (Ipomoea batatas (L.) Lam.). PLoS ONE, 8(5), e62707. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0062707>
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I.M., & Murphy, A. (2015). Plant physiology and development (6th ed.). Sinauer Associates.
- Woolfe, J.A. (1992). Sweet potato: An untapped food resource. Cambridge University Press.

Recepción: 29.01.2026

Revisión: 31.03.2026

Publicación: 08.05.2026

<https://orcid.org/0000-0002-1043-8124>

<https://orcid.org/0009-0003-8341-577X>

UTENSILIOS DE MAQUILLAJE: ¿UN RESERVORIO INVISIBLE DE BACTERIAS?

MAKEUP TOOLS: AN INVISIBLE RESERVOIR OF BACTERIA?

*Ruth Ana Maria Gonzalez¹

Luis Gustavo Dominguez Garcia²

¹Posgrado en Microbiología

Centro de Investigaciones en Ciencias Microbiológicas

Instituto de Ciencias

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Avenida San Claudio S/N. Col. San Manuel, Puebla, Puebla. México.

Tel. +52 01 222 2295500 ext 2546

²Alumno de la Facultad de Ciencias Biológicas

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Avenida San Claudio S/N. Col. San Manuel, Puebla, Puebla. México

Correos:

ruth.gonzalezv@correo.buap.mx

gdominguezgarcia53@gmail.com

Resumen

El uso cotidiano de utensilios de maquillaje como brochas y esponjas representa una práctica extendida a nivel global; sin embargo, su higiene suele ser subestimada. Estos objetos, al entrar en contacto directo con la piel, pueden convertirse en reservorios de microorganismos si no se limpian ni almacenan adecuadamente. En este estudio se analizaron 60 utensilios de maquillaje (30 brochas y 30 esponjas) pertenecientes a mujeres del estado de Puebla, México. Se observó que el 40 % presentaba crecimiento bacteriano, siendo las esponjas las más contaminadas. Se identificaron bacterias propias de la microbiota cutánea, así como microorganismos oportunistas asociados a ambientes húmedos. Los resultados destacan la importancia de prácticas básicas de higiene para prevenir posibles afecciones cutáneas y subrayan la necesidad de generar conciencia sobre los riesgos microbiológicos en objetos de uso cotidiano.

Palabras clave: maquillaje, bacterias, microbiota cutánea, higiene, contaminación.

Abstract

Makeup tools such as brushes and sponges are widely used in daily life; however, their hygiene is often overlooked. Due to their direct contact with the skin, these objects can become reservoirs of microorganisms if not properly cleaned and stored. In this study, 60 makeup tools (30 brushes and 30 sponges) from women in Puebla, Mexico, were analyzed. Results showed that 40% exhibited bacterial growth, with sponges being the most contaminated. Both skin microbiota and opportunistic bacteria associated with humid environments were identified. These findings highlight the importance of hygiene practices and raise awareness about microbiological risks in everyday objects.

Keywords: makeup, bacteria, skin microbiota, hygiene, contamination.

Objetivo

Evaluar la presencia y el nivel de contaminación bacteriana en utensilios de maquillaje de uso cotidiano (brochas y esponjas) en mujeres del estado de Puebla, así como analizar su relación con los hábitos de limpieza y almacenamiento, con el fin de identificar posibles riesgos para la salud cutánea y promover prácticas adecuadas de higiene.

Introducción

El maquillaje más allá de la estética

El maquillaje ha acompañado a la humanidad desde tiempos antiguos como una expresión cultural, social y estética (Eldridge, 2015).

En la actualidad, su uso cotidiano forma parte de rutinas personales en millones de personas alrededor del mundo. Sin embargo, detrás de esta práctica aparentemente inofensiva, existe un aspecto poco explorado: su relación con la microbiología. Los utensilios de maquillaje —especialmente brochas y esponjas— no solo distribuyen productos cosméticos, sino que también interactúan directamente con la superficie de la piel, facilitando el intercambio de microorganismos (Kajita & Nakamura, 2021).

La piel: un ecosistema vivo

La piel humana alberga una comunidad diversa de microorganismos conocida como microbiota cutánea (Grice & Segre, 2011; Byrd et al., 2018).

Este ecosistema incluye bacterias, hongos y virus que, en condiciones normales, cumplen funciones protectoras (Dreno et al., 2016). No obstante, cuando este equilibrio se altera —por ejemplo, mediante la introducción de bacterias externas— pueden desarrollarse afecciones como foliculitis, dermatitis o infecciones oportunistas (Matsuoka et al., 2006).

Objetos cotidianos como reservorios bacterianos

Diversos estudios han demostrado que los objetos de uso personal pueden funcionar como reservorios de bacterias, especialmente cuando no se limpian adecuadamente o se almacenan en condiciones inadecuadas (Otter et al., 2013; Scott et al., 2009). En el caso de los utensilios de maquillaje, estos factores se combinan con residuos cosméticos y humedad, creando condiciones ideales para el crecimiento microbiano (Agi et al., 2023; Attar & Imam, 2025).

¿Qué se investigó?

Con el objetivo de evaluar la contaminación bacteriana en utensilios de maquillaje, se analizaron 60 muestras (30 brochas y 30 esponjas) pertenecientes a 30 mujeres del estado de Puebla. Además, se recabó información sobre hábitos de uso, frecuencia de limpieza y lugar de almacenamiento.

¿Cómo se realizó el análisis?

Las muestras fueron procesadas mediante técnicas microbiológicas convencionales. Se utilizaron medios de cultivo específicos, incluyendo agar cromogénico universal, que permite la identificación preliminar de bacterias mediante cambios de color en las colonias en un periodo de 24 horas. Este tipo de metodología ha sido ampliamente utilizada para detectar microorganismos en superficies de uso cotidiano (Liu et al., 2020).

Lo que muestran las imágenes del laboratorio

Las placas de cultivo revelaron colonias bacterianas con distintas coloraciones, lo que permitió su identificación preliminar mediante características fenotípicas. (figura 1)

¿Qué revelaron los resultados?

Los hallazgos mostraron que:

- El 60 % de los utensilios no presentó crecimiento bacteriano detectable
- El 40 % presentó contaminación bacteriana
- Algunos utensilios mostraron múltiples especies bacterianas

Resultados similares han sido reportados en estudios previos sobre utensilios cosméticos, donde se observa una alta variabilidad en la carga microbiana (Attar & Imam, 2025).

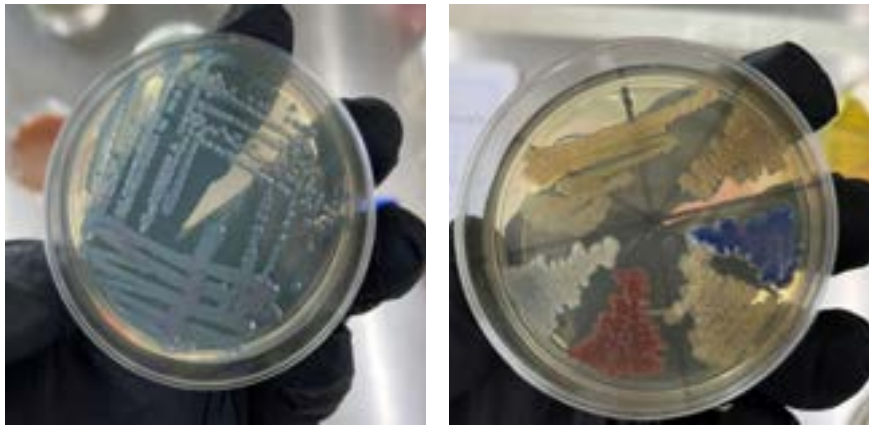


Figura 1. Colonias bacterianas obtenidas de utensilios de maquillaje en agar cromogénico.

Las colonias bacterianas presentan diferentes coloraciones y morfologías, lo que permite su identificación preliminar. Este tipo de medio facilita la diferenciación de microorganismos presentes en superficies de uso cotidiano.

Fotografías tomadas por Luis Gustavo Domínguez García

Bacterias encontradas: más allá de lo esperado

Entre las bacterias detectadas se encontraron microorganismos propios de la piel, así como bacterias oportunistas. Entre ellas destacan *Escherichia coli*, *Enterococcus faecalis* y *Kleb-*

siella pneumoniae, las cuales están asociadas con contaminación ambiental y pueden actuar como patógenos oportunistas (Agi et al., 2023; Flores et al., 2014).

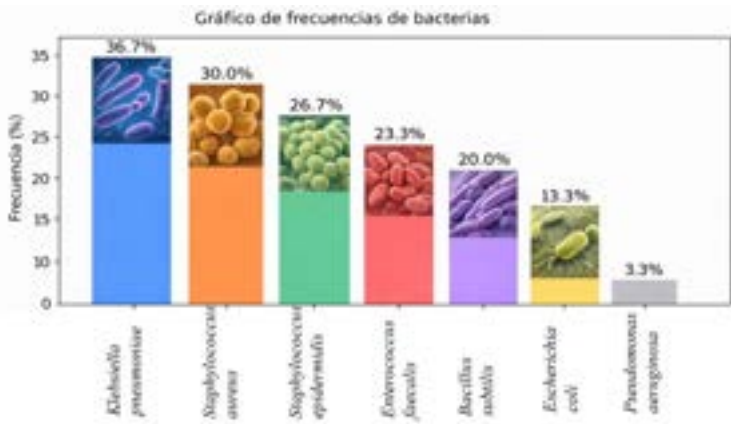


Figura 2. Distribución porcentual de bacterias aisladas.

Se muestran las frecuencias relativas de cada especie bacteriana en la muestra analizada: *Klebsiella pneumoniae* (36.7%), *Staphylococcus aureus* (30.0%), *Staphylococcus epidermidis* (26.7%), *Enterococcus faecalis* (23.3%), *Bacillus subtilis* (20.0%), *Escherichia coli* (13.3%) y *Pseudomonas aeruginosa* (3.3%). Los valores sobre cada barra indican el porcentaje correspondiente.

Brochas vs esponjas: una diferencia clave

Las esponjas mostraron mayor contaminación que las brochas. Esto se debe a su estructura porosa, su capacidad para retener humedad y

la dificultad para su secado completo, lo que favorece la proliferación bacteriana (Wong et al., 2022).



Figura 3. Comparación de la frecuencia de contaminación bacteriana entre utensilios de maquillaje. Las esponjas presentan mayor contaminación bacteriana que las brochas, debido a su estructura porosa y retención de humedad.

El baño: un punto crítico de contaminación

El baño representa uno de los ambientes domésticos con mayor potencial de contaminación microbiana, debido a la combinación de humedad constante, ventilación limitada y generación de aerosoles durante el uso del sanitario. Estas condiciones favorecen la supervivencia, dispersión y depósito de microorganismos en superficies y objetos de uso cotidiano (Flores et al., 2014; Otter et al., 2013).

Uno de los principales mecanismos de contaminación es la aerosolización de partículas durante la descarga del inodoro, fenómeno conocido como *toilet plume*. Este proceso puede dispersar microorganismos provenientes del tracto gastrointestinal hacia el aire y depositarlos en superficies cercanas, incluyendo lavabos, encimeras y objetos personales (Chawla et al., 2023).

En consecuencia, utensilios como brochas y esponjas de maquillaje almacenados en este entorno pueden contaminarse indirectamente, aun sin contacto directo con fuentes visibles de suciedad.

Además, la alta humedad característica del baño crea un microambiente ideal para la persistencia y proliferación bacteriana.

A diferencia de superficies secas, donde muchos microorganismos no sobreviven por largos periodos, las condiciones húmedas permiten que bacterias como *Escherichia coli*, *Enterococcus faecalis* o *Klebsiella pneumoniae* mantengan su viabilidad por más tiempo (Flores et al., 2014).

A esto se suma que los utensilios de maquillaje, especialmente las esponjas, poseen estructuras porosas que retienen agua y residuos cosméticos.

Esta combinación de nutrientes y humedad favorece la formación de nichos microbianos donde las bacterias pueden multiplicarse (Wong et al., 2022).

En conjunto, estos factores convierten al baño en un punto crítico de contaminación, donde la interacción entre condiciones ambientales

y prácticas de almacenamiento inadecuadas incrementa el riesgo de que los utensilios de maquillaje actúen como reservorios de microorganismos potencialmente patógenos.

¿Por qué importa este problema?

Aunque muchas de las bacterias identificadas en este estudio forman parte de la microbiota normal de la piel, su presencia en utensilios de uso cotidiano no debe subestimarse. Cuando estos objetos no se limpian adecuadamente, pueden actuar como vehículos de transferencia de microorganismos, favoreciendo su acumulación y reintroducción constante en la piel.

Este proceso es especialmente relevante en personas con condiciones cutáneas como acné, irritación o pequeñas lesiones, donde la barrera protectora de la piel se encuentra comprometida. En estos casos, bacterias oportunistas pueden colonizar con mayor facilidad y contribuir al desarrollo de infecciones o al empeoramiento de afecciones dermatológicas (Matsuoka et al., 2006).

Además, la detección de bacterias asociadas a contaminación ambiental, como *Escherichia coli* o *Enterococcus faecalis*, pone en evidencia que los utensilios de maquillaje no solo reflejan la microbiota propia de la piel, sino también las condiciones del entorno en el que se almacenan (Flores et al., 2014). Esto refuerza la idea de que prácticas cotidianas aparentemente inofensivas, como guardar los utensilios en el baño, pueden incrementar el riesgo microbiológico.

Desde una perspectiva de salud pública, estos hallazgos son relevantes porque evidencian cómo objetos comunes pueden convertirse en reservorios de microorganismos si no se manejan adecuadamente. A diferencia de otros riesgos más visibles, la contaminación microbiana es invisible, lo que dificulta la percepción del peligro y reduce la adopción de medidas preventivas.

Sin embargo, este riesgo puede mitigarse fácilmente mediante acciones simples, como la limpieza regular de los utensilios, su secado com-

pleto y su almacenamiento en ambientes secos y ventilados. Estas prácticas no solo reducen la carga microbiana, sino que también contribuyen al mantenimiento del equilibrio de la microbiota cutánea (Kampf, 2018).

En conjunto, comprender la microbiología de los objetos de uso cotidiano permite generar conciencia sobre la importancia de la higiene personal más allá de lo evidente, y resalta la necesidad de incorporar hábitos preventivos en la vida diaria para proteger la salud de la piel.

Conclusión

Los utensilios de maquillaje pueden convertirse en reservorios invisibles de bacterias cuando no se higienizan ni almacenan correctamente. Este estudio resalta la importancia de promover hábitos de higiene adecuados y de generar conciencia sobre los riesgos microbiológicos en objetos de uso cotidiano.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

Declaración de privacidad

Los datos pueden compartirse a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Descargo de responsabilidad (Inteligencia Artificial): Los autores declaran que NO se utilizaron tecnologías de IA generativa en la redacción de este manuscrito.

Agradecimientos

Se agradece a las participantes del estudio y al laboratorio que permitió la realización de los análisis microbiológicos.

Referencias

- Agi, V., Nwokah, E. G., & Barivule, G. (2023). Isolation and identification of microorganisms from makeup brushes in Rivers State University Nigeria and its environs. *Journal of Advances in Microbiology*, 23(3), 41–50. <https://doi.org/10.9734/jamb/2023/v23i3715>
- Attar, R. M., & Imam, M. A. (2025). Assessing the levels and types of bacterial contamination in cosmetic brushes: Implications for beauty and hygiene in Jeddah City. *International Journal of Microbiology*, 2025, Article 2128581. <https://doi.org/10.1155/ijm/2128581>
- Byrd, A. L., Belkaid, Y., & Segre, J. A. (2018). The human skin microbiome. *Nature Reviews Microbiology*, 16(3), 143–155. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2017.157>
- Dréno, B., Araviiskaia, E., Berardesca, E., Bieber, T., Hawk, J., Sanchez Viera, M., & Tan, J. (2016). The skin microbiome: A new actor in inflammatory acne. *American Journal of Clinical Dermatology*, 17(3), 203–211. <https://doi.org/10.1007/s40257-020-00531-1>
- Eldridge, L. (2015). Face paint: The story of makeup. Abrams. (dlwqtxts1xzle7.cloudfront.net)
- Flores, G. E., Bates, S. T., Knights, D., Lauber, C. L., Stombaugh, J., Knight, R., & Fierer, N. (2014). Microbial biogeography of public restroom surfaces. *PLoS ONE*, 9(11), e111242. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0028132>
- Grice, E. A., & Segre, J. A. (2011). The skin microbiome. *Nature Reviews Microbiology*, 9(4), 244–253. <https://doi.org/10.1038/nrmicro2537>
- Kajita, M., & Nakamura, S. (2021). Basic research on how to apply foundation makeup evenly on your own face. In *International Conference on Entertainment Computing* (pp. 123–130). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-89394-1_32
- Kampf, G. (2018). Biocidal agents used for disinfection can enhance antibiotic resistance in Gram-negative species. *Antibiotics*, 7(4), 110. <https://doi.org/10.3390/antibiotics7040110>
- Chawla, H., Anand, P., Garg, K., Bhagat, N., Varmani, S. G., Bansal, T., ... & Marwah, R. G. (2023). A comprehensive review of microbial contamination in the indoor environment: sources, sampling, health risks, and mitigation strategies. *Frontiers in Public Health*, 11, 1285393. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1285393>
- Matsuoka, Y., Sugimoto, N., & Aiba, S. (2006). Effects of skin care and makeup under instructions from dermatologists on the quality of life of female patients with acne vulgaris. *The Journal of Dermatology*, 33(11), 745–752. <https://doi.org/10.1111/j.1346-8138.2006.00174.x>
- Otter, J. A., Yezli, S., & French, G. L. (2013). The role of contaminated surfaces in the transmission of pathogens in healthcare settings. *Infection Control & Hospital Epidemiology*, 34(5), 449–456. https://doi.org/10.1007/978-3-319-08057-4_3
- Scott, E., Bloomfield, S. F., & Barlow, C. G. (2009). An investigation of microbial contamination in the home. *Journal of Applied Microbiology*, 89(S1), 137S–144S. <https://doi.org/10.1017/S0022172400070819>
- Wong, A., Chen, D., & Freer, K. (2022). The cleanliness of Beautyblenders: Microbial contamination of cosmetic sponges. *BCIT Environmental Public Health Journal*. <https://doi.org/10.47339/ephj.2022.211>