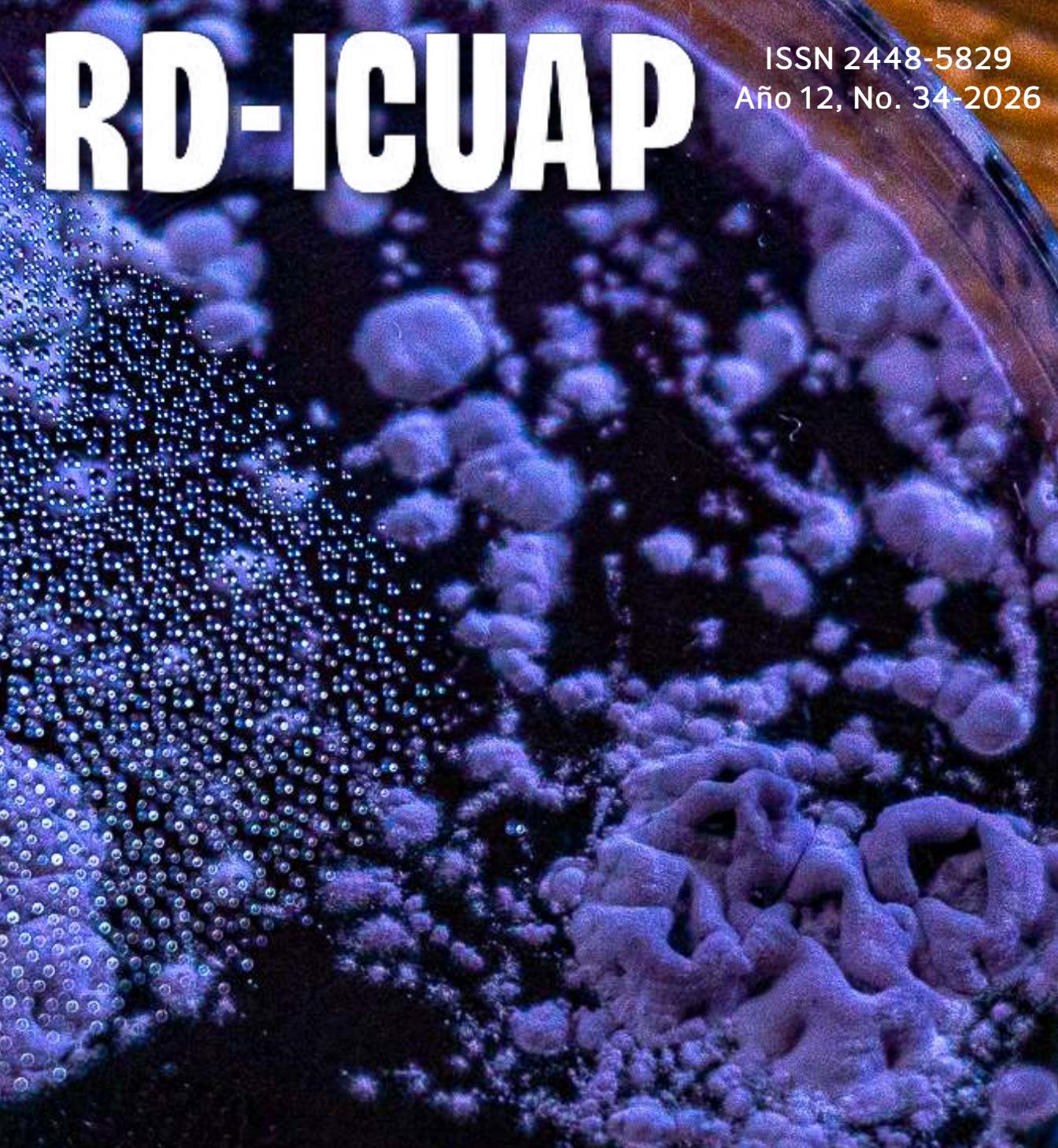


RD-ICUAP

ISSN 2448-5829
Año 12, No. 34-2026



Año 12 No. 34 Enero - Abril 2026
Reserva No. 04-2021-092723014900-203
<http://rd.buap.mx/ojs-dm/index.php/rdicuap>
Difusión vía red de cómputo
RD-ICUAP Es una publicación del Instituto de Ciencias
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

latindex

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 Castelan 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. Alejandra Abigail Tejeda Flores
Est. Victoria Ocaña Lozano
Est. Mariana Díaz García
Est. Sebastian Morelos Ayaquica
Est. David Hernández Badillo
Est. Diana Nequis Herrera

Jefatura de Plataformas

Ing. Genaro Rodríguez Rodríguez

Portada

Carlos Castillo Gasca

RD-ICUAP

CINTILLO LEGAL

AÑO 12 NO. 34

RD – ICUAP Año 12, No. 34, enero–abril 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 derecho 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, diciembre 2025.

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

EDITORIAL

AÑO 11 NO. 32

Nos complace saludar nuevamente encontrarnos con nuestros lectores y seguidores y al público en general. Con entusiasmo, les presentamos el número Año 12 No. 34 del año 2026 de nuestra revista, correspondiente al duodécimo año de publicación, reafirmando nuestro compromiso y la comunicación pública de los avances científicos e investigaciones.

Reafirmamos nuestro objetivo al divulgar las investigaciones recientes 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. Durante el verano en el mes de julio acercamos la ciencia en el Verano Científico Infantil para los pequeños de 6 a 12 años. 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. 34 en este número, está a su disposición: 21 contribuciones, 19 son artículos, y 2 notas.

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 **Journalrd**, el Facebook **CCien Buap**, en X **@lcuapRd**, en BlueSky **journal.bsky.social**.

Agradecemos Carlos Castillo Gasca, ganador del segundo lugar del concurso de fotografía científica RD-ICUAP, edición 2025. En esta fotografía muestra la placa de Petri se convierte en un lienzo donde la naturaleza pinta sus obras más abstractas. Las colonias de hongos, cultivadas en el laboratorio, revelan una paleta cromática sorprendente, dominada por el púrpura. 'Sueños Púrpuras' no solo captura la belleza estética de este microcosmos, sino también el resultado de un proceso científico meticuloso, que convierte la ciencia en arte."

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

Enrique González Vergara

Editor responsable

Beatriz Espinosa Aquino

Editora responsable

ÍNDICE

AÑO 12 NO. 34

PRESENTACIÓN Y
CONVOCATORIA

EDITORIAL

- 10 - 47 REPERCUSIONES DE LA DIETA
SOBRE LA MICROBIOTA
INTESTINAL Y SU RELACIÓN
CON EFECTOS EN LA SALUD
PARTE 3 ISOFLAVONAS
DE SOYA: ¿UNA NUEVA
ESPERANZA PARA LAS MADRES
EN LACTANCIA?
- 48 - 59 LAS BATERÍAS DE ION-
LITIO: FUNCIONAMIENTO,
COMPOSICIÓN, PELIGROS E
IMPACTO AMBIENTAL
- 60 - 72 PROPIEDADES ANTIOXIDANTES
Y ANTIMICROBIANAS DE LA
FORSITIA: UNA ALTERNATIVA
PROMETEDORA EN LA
BÚSQUEDA DE TRATAMIENTOS
NATURALES Y SEGUROS
- 73 - 83 DE LA CAÑA DE AZÚCAR A
LA GASOLINA: LA CIENCIA
DETRÁS DEL E10 Y LOS
BIOCOMBUSTIBLES EN MÉXICO
- 84 - 95 GENERADOR EÓLICO: CUANDO
EL VIENTO SE VOLVIÓ
ELECTRICIDAD
- 96 - 110 BRUGMANSIA ARBOREA
(FLORIPONDIO): REVISIÓN
ETNOFARMACOLÓGICA Y
ANÁLISIS DE INVESTIGACIONES
BIOMÉDICAS RECIENTES

111 - 126	SIMULAR PARA CURAR: EL PAPEL DE LA CIENCIA DIGITAL EN EL DESARROLLO DE NUEVOS FÁRMACOS
125 - 136	ZEOLITAS NANOESTRUCTURADAS: APLICACIONES BIOMÉDICAS Y POTENCIAL TERAPÉUTICO EN ENFERMEDADES CRÓNICAS
139 - 149	DEL RESIDUO AL RECURSO: PLÁSTICOS BIODEGRADABLES Y ECONOMÍA CIRCULAR EN PUEBLA
150 - 160	¿ES POSIBLE ESCAPAR DE LOS MICROPLÁSTICOS? EL RETO AMBIENTAL MÁS GRANDE DE NUESTRA ERA
61 - 174	LAS PLANTAS: UNA OPORTUNIDAD DE TRATAMIENTO PARA LA MALARIA
175 - 186	TOMOGRFÍA COMPUTARIZADA PARA LA INDUSTRIA POBLANA: VER POR DENTRO SIN DESTRUIR
187 - 199	INFLUENZA, UN VIRUS EN CONSTANTE CAMBIO
200 - 207	EL ÁCIDO 5-AMINOLEVULÍNICO (5-ALA) Y LA PSICOPATÍA: UNA CONEXIÓN INESPERADA ENTRE LA BIOQUÍMICA Y LA MENTE CRIMINAL
208 - 218	LA MAGIA EN LA FRONTERA: CÓMO LOS MATERIALES QUE NO ERAN NI AISLANTES NI CONDUCTORES, REVOLUCIONARON EL MUNDO
219 - 234	USO DE RESIDUOS DE LA PRODUCCIÓN DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) PARA LA FABRICACIÓN DE ADOQUINES
235 - 244	HABLEMOS DE CURADURÍA DE CONTENIDOS
245 - 255	ALIMENTAR EL FUTURO DE LA HUMANIDAD ¿ES LA HIDROPONÍA REALMENTE UNA SOLUCIÓN MÁS SOSTENIBLE?

256 - 269

GENES Y AMBIENTE: EL DÚO
INVISIBLE DETRÁS DE MUCHAS
ENFERMEDADES

NOTAS

271 - 276

VISITA DE LA DRA. LILIANA
MAMMINO A LA BUAP

277 - 281

INFANCIAS MEXICANAS LLEGAN A
LA FINAL



ARTÍCULOS

RD-IGUAP

AÑO 12 NO. 34

Recepción: 04.05.2025

Revisión: 06.11.2025

Publicación: 15.01.2026

<https://orcid.org/0009-0008-8074-8225>

<https://orcid.org/0000-0002-4135-9605>

<https://orcid.org/0000-0001-9509-908X>

REPERCUSIONES DE LA DIETA SOBRE LA MICROBIOTA INTESTINAL Y LA RELACIÓN CON EFECTOS EN LA SALUD, EUBIOSIS Y DISBIOSIS. PARTE 3. MICROBIOTA Y ENFERMEDADES GRAVES -MEDICINA PREVENTIVA-, PROBIÓTICOS Y PREBIÓTICOS ESPECÍFICOS

REPERCUSSIONS OF DIET ON THE GUT MICROBIOTA AND ITS
RELATIONSHIP WITH HEALTH EFFECTS, EUBIOSIS, AND DYSBIOSIS.
PART 3. MICROBIOTA AND SERIOUS DISEASES—PREVENTIVE
MEDICINE—SPECIFIC PROBIOTICS AND PREBIOTICS

Salvador Negrete-Lira

Rolando Salvador García-Gómez

María del Carmen Durán-Domínguez-de-Bazúa

Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad
de Química, Departamento de Ingeniería Química,
Laboratorios 301, 302 y 303 de Ingeniería Química
Ambiental y de Química Ambiental, Edificio E-3
Alimentos y Química Ambiental, Conjunto E,
Circuito de la Investigación Científica s/n, Ciudad
Universitaria, 04510 Ciudad de México, México.

Correos:

salvador.n1538@gmail.com

rolandogarciagomez@quimica.unam.mx

mcduaran@quimica.unam.mx

Resumen (tres partes)

La salud es un tema importante para la vida de los seres humanos y hasta relativamente pocos años se ha encontrado que la microbiota intestinal o flora microbiana que simbióticamente coexiste con ellos tiene una estrecha relación con la dieta y la salud holística del Homo sapiens. Por cuestiones éticas las ratas de la estirpe Wistar ha sido desde hace más de un siglo el objeto de estudio y en esta breve revisión bibliográfica dividida en tres partes, el objetivo global fue buscar las posibles relaciones de la dieta desde el nacimiento hasta la senectud sobre la microbiota intestinal. En la **primera parte** se abordaron sus efectos en el sistema inmunológico y digestivo y se buscaron estudios sobre organismos carentes de microbiota u “organismos libres de gérmenes” (“germ free” en inglés) desde el punto de vista de la salud. En la **segunda parte** se dio particular importancia a los estudios sobre los efectos sobre la microbiota intestinal de los aditivos alimentarios por sus amplias aplicaciones en la industria alimentaria y bebidas no alcohólicas, así como sobre cambios fisiológicos, metabólicos o nutrimentales provocados por diversas enfermedades que afectan la salud del hospedero o anfitrión. En la **tercera parte** se buscaron también estudios sobre probióticos y prebióticos específicos que mejoren o mantengan la eubiosis (equilibrio en la microbiota) y se dan pautas para mejorarla a través de la medicina preventiva. Pudo constatarse en estos tres enfoques que, **para la primera parte**, la dieta repercute en el desarrollo completo del tracto gastrointestinal desde el momento de nacer, así como en el funcionamiento del sistema inmunológico. Los organismos carentes de microbiota u “organismos libres de gérmenes” (“germ free” en inglés) tienen problemas de salud a lo largo de su vida. **En la segunda parte**, los aditivos alimentarios como los edulcorantes y los conservadores demostraron tener efectos negativos sobre la microbiota intestinal. La disbiosis intestinal puede promover desregulaciones en el organismo provocando inflamaciones sistémicas, así como enfermedades autoinmunes o mal funcionamiento inmunitario. **Finalmente, en la tercera parte**, se encontró que la inmunoregulación es de suma importancia para un sano funcionamiento del sistema inmune aún en individuos sanos mediante probióticos, prebióticos y alimentos especializados. Algunos estudios recomiendan que la medicina preventiva considere las relaciones entre la microbiota intestinal y el resto de los sistemas del hospedero (anfitrión).

Palabras clave: Microbiota intestinal, ratas de la estirpe Wistar, eubiosis, disbiosis, aditivos alimentarios, sistema inmunológico, desarrollo y funcionamiento del sistema inmune

Nota: Estas tres contribuciones están basadas en la tesis profesional del primer autor. Algunas partes están transcritas de ese libro. De acuerdo con los tiempos actuales en que se están usando paqueterías que detectan similitudes, obviamente, estas transcripciones aparecerían en un análisis empleando estas paqueterías. Los dos coautores, que fueron sus asesores, consideran que esto es aceptable. Los tres autores invitan a las y los lectores(as) a leer la tesis en TESIUNAM si desean ampliar lo presentado en estas tres contribuciones

(132.248.9.195/ptd2022/noviembre/0833114/Index.html)

Abstract (Three parts)

Health is an important issue for the life of human beings and until relatively few years it has been found that the intestinal microbiota or microbial flora that symbiotically coexists with them has a close relationship with the diet and holistic health of Homo sapiens. For ethical reasons, rats of the Wistar strain have been the object of study for more than a century and in this brief bibliographic review divided into three parts, the overall objective was to search for the possible relationships of the diet from birth to senescence on the intestinal microbiota. **In the first part**, its effects on the immune and digestive systems were addressed. **In the second part**, particular importance was given to studies on the effects of food additives on the intestinal microbiota due to their wide applications in the food and non-alcoholic beverage industry, as well as on physiological, metabolic or nutritional changes caused by various diseases that affect the health of the host or host. **In the third part**, studies were also sought on specific probiotics and prebiotics that improve or maintain eubiosis (balance in the microbiota) and guidelines are given to improve it through preventive medicine. It could be seen in these three approaches that, **for the first part**, diet has an impact on the complete development of the gastrointestinal tract from the moment of birth, as well as on the functioning of the immune system. Organisms lacking microbiota or “germ-free organisms” have health problems throughout their lives. **In the second part**, food additives such as sweeteners and preservatives were shown to have negative effects on the intestinal microbiota. Intestinal dysbiosis can promote deregulation in the body, causing systemic inflammation, as well as autoimmune diseases or immune malfunction. Finally, **in the third part**, it was found that immunoregulation is of utmost importance for a healthy functioning of the immune system even in healthy individuals through probiotics, prebiotics and specialized foods. Some studies recommend that preventive medicine consider the relationships between the intestinal microbiota and the rest of the host systems.

Keywords: Intestinal microbiota, Wistar rats, food additives, immune system, development and functioning of the immune system

Note: These three contributions are based on the professional thesis of the first author. Some parts are transcribed from that book. In accordance with the current times in which packages that detect similarities are being used, obviously, these transcripts would appear in an analysis using these packages. The two co-authors, who were his advisors, consider this to be acceptable. The three authors invite readers to read the thesis in TESIUNAM if they wish to expand on what is presented in these three contributions (132.248.9.195/ptd2022/noviembre/0833114/Index.html)

Introducción

Ya en las dos primeras partes se señalaron los vínculos entre la salud de las personas y su microbiota intestinal, buscando el equilibrio, la eubiosis. Lo opuesto, la disbiosis, es el estado en desequilibrio, relacionado con diversos estados patológicos, que es de origen multifactorial (Gual-Grau, 2019; Marqués et al., 2015; Neyrinck et al., 2012). También se mencionó que la dieta es clave para el estado de la microbiota intestinal, causando obesidad y ambios fisiológicos y metabólicos (Gual-Grau, 2019; Marqués et al., 2015; Neyrinck et al., 2012).

Se mencionaron también las enfermedades autoinmunes, que están controladas por los genes del hospedero o anfitrión y una intervención del ambiente. Los propios órganos del individuo se tornan en los objetivos de ataque del sistema inmune, ya que la especificidad antígeno/anticuerpo se ve afectada. El daño orgánico puede estar mediado por las células TCD4+, TCD8+, inmunoglobulinas y un mal funcionamiento general del sistema inmune. Las enfermedades autoinmunes ocurren hasta en un 5% de la población. Como se mencionó en la segunda parte, las más comunes son la diabetes tipo 1, la artritis reumatoide, la esclerosis múltiple, el lupus sistémico eritematoso, la enfermedad inflamatoria intestinal, la enfermedad de Addison, la tiroiditis de Hashimoto, la miastenia grave, la vasculitis autoinmune, la anemia perniciosa, la enfermedad celiaca, la hepatitis autoinmune, etc. (Marrack et al., 2001). Recientemente, se ha relacionado a las enfermedades autoinmunes con la microbiota intestinal. Al existir una constante comunicación entre la microbiota con el sistema inmune es probable que el mal funcionamiento del sistema inmune comience desde algún mecanismo provocado por la microbiota. Aunque se desconocen los mecanismos, la literatura científica reciente asocia la diabetes tipo 1, la enfermedad celiaca, la artritis reumatoide, entre otras enfermedades autoinmunes con la disbiosis (McLean et al., 2015).

En ratas de la estirpe Wistar se han estudiado diversas enfermedades autoinmunes graves como la esclerosis múltiple. Esta es una enfermedad crónica neurodegenerativa que conduce a la desmielinización de las fibras nerviosas. La esclerosis múltiple es una de las principales causas de discapacidad no producida por traumas en todo el mundo. Esta enfermedad se caracteriza por episodios de inflamación, desmielinización de las neuronas y gliosis (producción exagerada de células gliales -sustento de las células nerviosas- que generan cicatrices en el cerebro). Este padecimiento provoca distintos síntomas como ataxia (trastorno motor que impide la coordinación de movimientos voluntarios), pérdida sensorial, problemas de visión, falta de equilibrio, debilidad muscular y pérdida neuronal, reduciendo considerablemente la esperanza de vida (Rasool et al., 2022).

La esclerosis múltiple es causada por lesiones edematosas (lesiones causadas por hinchazones, provocadas a su vez por acumulación anormal de líquido), inicialmente provocadas por infiltraciones de células mononucleares, células T auxiliares y macrófagos. Esta infiltración produce inflamación en la materia blanca del cerebro y reduce la integridad estructural de la vaina de mielina. Esta inflamación cerebral puede surgir a partir de inflamaciones sistémicas provenientes de cualquier alteración del sistema inmunológico. El tratamiento de esta patología es una serie de fármacos que solamente detienen parte del progreso de la enfermedad. No obstante, hasta el momento no se ha conseguido una cura o un tratamiento definitivo (Rasool et al., 2022). En este estudio se provocó a ratas Wistar esclerosis múltiple inyectando durante 3 semanas un lipopoliglúcido que producía neurotoxicidad en la región lumbosacra (región de vértebras de la parte baja de la columna). Las ratas presentaron síntomas como parálisis parcial de extremidades traseras y cola, letargo y pérdida de masa. Una vez confirmada la neurodegeneración en las ratas, se conformaron 7 grupos experimentales.

A 5 de los grupos se les suministraron extractos de *Nepeta hindustana* L., *Vitex negundo* L., *Argemone albiflora* L., la combinación de los tres extractos y un medicamento estándar empleado en el tratamiento de la esclerosis (nimodipina, antagonista del calcio del grupo de las dihidropirinas con efecto vasodilatador periférico e hipotensor que aumenta el flujo sanguíneo cerebral, actuando como antiisquémico cerebral), respectivamente. El estudio se centró en los diversos cambios fisiológicos mostrados por las ratas Wistar. La combinación de los tres extractos herbales tuvieron resultados similares al fármaco nimodipina. Los extractos herbales mostraron efectos neuroprotectores, presencia de fitoquímicos antiinflamatorios y metabolitos secundarios que indican que ha ocurrido un proceso de desmielinización. Además, se observó una supresión de los marcadores de estrés. La supresión de marcadores de estrés indica reparación del daño molecular y menos daños en el ADN. Lo anterior deja un campo abierto a la investigación para emplear estas hierbas como una alternativa más eficaz que el fármaco (Rasool et al., 2022).

En el estudio realizado por Chen et al. (2009) se utilizó cafeína en dosis de 10 y 30 mg/kg para combatir la encefalomiелitis autoinmune experimental (considerada modelo útil de esclerosis múltiple). En ratas Wistar se indujo esta enfermedad al inyectar de forma subcutánea en las almohadillas de los pies un extracto crudo de médula espinal de cobayo y una mezcla con el microorganismo *Bacillus* de Calmette-Guerin, BCG. Este microorganismo comúnmente es usado para sobre-estimular el sistema inmune en investigaciones con mamíferos. Los resultados histológicos mostraron que las ratas alimentadas con cafeína en ambas dosis tuvieron una menor migración de células inflamatorias en la corteza cerebral y la médula espinal, así como una disminución del nivel de IFN- γ (Interferon gama, tipo específico de citocina cuya función más importante es la activación de macrófagos con capacidad fagocitaria). Las ratas que no consumieron cafeína mostraron desmielinización (Chen et al., 2009). La cafeína ejerce un

papel inmunomodulador, mejorando el equilibrio entre Th1 y Th2, así como la proliferación de linfocitos. La cafeína mostró efectos contra lesiones cerebrales, como la lesión del cerebro isquémico (cerebro con lesiones causadas en general por coágulos sanguíneos, evitando que la sangre fluya en el cerebro y matando células cerebrales en cuestión de minutos). Este efecto podría proporcionar un amplio espectro de neuro-protección en trastornos neurológicos humanos (Chen et al., 2009).

En el estudio de Noor et al. (2015) se utilizaron semillas de *Nigella sativa* (comino negro) como tratamiento para la encefalomiелitis autoinmune experimental. Se suministró a ratas de estirpe Wistar un extracto de las semillas en dosis de 2.8 g/kg m.c. (masa corporal). De modo similar al ejemplo anterior, las ratas tuvieron una ausencia de la infiltración de células inflamatorias meníngeas en la médula del cerebelo. Los autores mencionan que el compuesto útil de las semillas es la timoquinona, presente en el aceite volátil de la semilla. La timoquinona se ha reportado múltiples veces como un compuesto que suprime el exceso de células inflamatorias. Finalmente, el estudio concluye mencionando la protección que ofrecen las semillas de *N. sativa* en el tratamiento de la encefalomiелitis experimental autoinmune (Noor et al., 2015).

La relación entre la microbiota intestinal y las enfermedades autoinmunes aún no se estudia de manera contundente con información acerca de las causas, mecanismos o posibles tratamientos. Tlaskalová-Hogenová et al. (2011) abordan brevemente la enfermedad celiaca que se desencadena por el gluten de trigo en la dieta para individuos genéticamente susceptibles. Esta enfermedad fue confirmada como autoinmune por el autoantígeno (molécula propia del cuerpo del individuo que es reconocida como amenaza y es atacada por el sistema inmune), llamado transglutaminasa tisular (Tlaskalová-Hogenová et al., 2011). Los autores mencionan que la barrera mucosa y sus disfunciones están directamente relacionadas con varias enfermedades autoinmunes. Por otra parte, existen

bacterias como *E. coli*, que promueven la activación de células inmunitarias, y otras como las bifidobacterias que tienen efectos inhibitorios. Por lo anterior, se menciona que los microorganismos de la microbiota intestinal tienen un efecto sobre los malfuncionamientos inmunes (Tlaskalová-Hogenová et al., 2011). En ratas de estirpe Wistar se ha observado que, al inducir enfermedad celiaca, existe un aumento de los linfocitos intraepiteliales del intestino, hiperplasia (aumento anormal y excesivo de ciertas células en un tejido) de las criptas intestinales (invaginaciones del epitelio o introducciones anormales de una porción del intestino en la que la precede o la sigue) y acortamiento de las vellosidades de la mucosa intestinal. Las ratas libres de gérmenes muestran efectos similares a sus homólogas con microbiota, presentando activaciones inmunes anormales ante la enfermedad celiaca (Tlaskalová-Hogenová et al., 2011).

Otra enfermedad autoinmune que se ha relacionado directamente con la microbiota intestinal es la diabetes tipo 1. Esta ocurre espontáneamente en varios mamíferos, lo que hace a las ratas Wistar un modelo animal que puede ser usado para explicar dicha patología. La diabetes tipo 1 tiene como resultado que las células del sistema inmune atacan a las células del páncreas (productoras de insulina). Se tiene la hipótesis de que esta enfermedad es desencadenada por factores ambientales, los cuales pueden ser absorbidos por el intestino debido a un problema de permeabilidad intestinal (Neu et al., 2005). Esta causa fue comprobada por Neu et al. (2005). En este estudio se observó que las ratas Wistar propensas a diabetes mostraban un mayor porcentaje de células calciformes y de la cripta mucosa. Una mayor presencia de células calciformes y de cripta se relaciona con mayor permeabilidad intestinal. Además, las ratas propensas a diabetes tipo 1 expresaron una menor cantidad de proteínas de la unión estrecha, provocando igualmente una mayor permeabilidad intestinal. Una alta permeabilidad intestinal aumentaría la probabilidad de que antígenos

ambientales accedan al organismo y desencadenen respuestas inmunes descontroladas, o bien, directamente respuestas autoinmunes (Neu et al., 2005). Esta teoría es llamada la hipótesis de la "tormenta perfecta" la cual concretamente menciona que un aumento de la permeabilidad intestinal, junto con una alimentación inadecuada, así como antígenos ambientales y microbianos permeando la mucosa intestinal, provocarían una respuesta inmune aberrante, y una sobre-reacción ante proteínas comunes que normalmente serían inofensivas (Neu et al., 2005). En las ratas Wistar propensas a diabetes tipo 1 se presentó aumento de permeabilidad en el intestino delgado pero no en el colon. Además, estas ratas presentaron una mayor excreción urinaria con una proporción anormal de lactulosa/manitol, antes del inicio de la diabetes. Esto sugiere que la proporción anormal de lactulosa/manitol es un posible indicador de la futura aparición de diabetes tipo 1. La administración de butirato, no muestra mejoras en la fortaleza de la unión estrecha. Lo anterior hace aún más importante la necesidad de evitar que se presente alta permeabilidad intestinal (Hansen et al., 2019; Neu et al., 2005).

Dados estos antecedentes de la segunda parte, en esta tercera parte se tiene como objetivo buscar la inmunoregulación para un sano funcionamiento del sistema inmune aún en individuos saludables mediante probióticos, prebióticos y alimentos especializados así como por el fortalecimiento de la medicina preventiva.

Estrategia de trabajo

Aunque resulte repetitivo, la estrategia usada incluyó la búsqueda de información de manera digital (artículos de investigación y artículos de revisión) en las bases de datos de la Biblioteca Digital de la UNAM, BiDi (Elsevier Scopus, ScienceDirect, Springer, ProQuest, SciFinder), en libros digitales consultados en la misma biblioteca y en bases de datos abiertos independientes de la UNAM. Debido a las características de confinamiento ocasionadas por el COVID-19, no

se planteó la obtención de datos experimentales de ningún tipo a nivel de laboratorio; por lo que el trabajo realizado fue de tipo documental. El procedimiento de ejecución fue el siguiente: Una vez que fueron encontrados los artículos de interés, se realizó su lectura, interpretación, análisis, abstracción y discernimiento de cada uno. Con ello, el enfoque que se buscó en esta tercera y última parte de los tres artículos se encontró relacionado con los siguientes incisos:

- a. El desarrollo de una nueva medicina preventiva que considere las relaciones entre la microbiota intestinal y el resto de los sistemas del hospedero (anfitrión)
- b. La importancia de la inmunoregulación para un sano funcionamiento del sistema inmune aún en individuos sanos mediante probióticos, prebióticos y alimentos especializados

Medicina preventiva relacionada con la microbiota intestinal

Al aumentar la esperanza de vida las enfermedades crónicas se vuelven las principales causas de muerte. Estas enfermedades representan hasta el 60% de todas las muertes mundiales de acuerdo con las estadísticas. Desafortunadamente, la atención médica se centra comúnmente en el tratamiento de la enfermedad en lugar de su prevención. El uso de la medicina preventiva podría reducir la tasa de mortalidad y extender aún más la esperanza de vida. Los recursos financieros destinados a las medidas preventivas no son suficientes. El prevenir enfermedades en lugar de tratarlas tendría como consecuencia ahorros económicos significativos y una mayor tasa de éxito en la recuperación de los pacientes. Los economistas concluyen que la medicina preventiva en complemento de la medicina curativa genera una mayor eficiencia de recursos y puede aumentar las reservas de los servicios de salud de cualquier país, permitiendo un efecto recíproco y aumentando el desarrollo general (Wang, 2018).

Enfermedades como el asma o la diabetes requieren de tratamientos curativos personalizados, una evaluación médica periódica y proporción constante de medicamentos y cuidados. La medicina preventiva puede evitar consumir recursos extras individuales. Además, la medicina preventiva puede aplicarse en las enfermedades que dependen de diversos factores: Ambientales, genéticos, relacionados con la alimentación, infecciones, etc. (Guilleminault et al., 2017).

En la gran mayoría de los países de América Latina, principalmente en Argentina, Brasil, Chile y México, existe un aumento acelerado de enfermedades crónicas como la diabetes e hipertensión. La diabetes tipo 2, en términos económicos representa una pesada carga económica para los sistemas de salud. Además, la diabetes provoca una mortalidad temprana. Los gastos que ocasiona la diabetes han mostrado un creciente aumento de los costos sanitarios como se muestra en la Figura 1. Además, existen poblaciones vulnerables que están fuera del alcance de los sistemas de salud, por lo que se estima que aún con el creciente gasto destinado a tratar esta enfermedad están sobrepasadas las estrategias del sector salud (Arredondo, 2014).

En México las principales causas de muerte son: Enfermedades cardíacas, diabetes mellitus y tumores malignos (Figura 2). A nivel mundial las principales causas de muerte son: Cardiopatía isquémica, accidente cerebro-vascular y enfermedad pulmonar obstructiva crónica (Figura 3).

Estas enfermedades tienen una fuerte repercusión en el desarrollo económico del país. Por lo tanto, es necesario reflexionar sobre la importancia de la prevención de estas enfermedades. Entre las estrategias para la prevención de enfermedades se deben tomar en cuenta las relaciones encontradas entre la microbiota intestinal y el desarrollo de diversas enfermedades (Arredondo, 2014; INEGI, 2022).

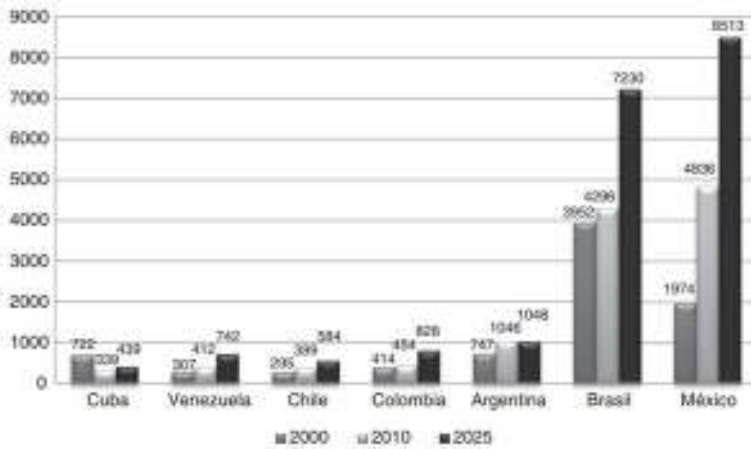


Figura 1. Millones de dólares gastados en atender pacientes con diabetes en varios países de América Latina, comparando los datos del año 2000, 2010 y presentando un costo aproximado para el año 2025 (Arredondo, 2014)

Principales causas de muerte por sexo⁷

Rango	Total	Hombre	Mujer
1	Enfermedades del corazón 218 885 En 2019 fueron 192 241	COVID-19 529 329	Enfermedades del corazón 97 233 En 2019 fueron 112 384
2	COVID-19 291 182	Enfermedades del corazón 121 637 En 2019 fueron 81 259	Diabetes mellitus 72 173 En 2019 fueron 52 842
3	Diabetes mellitus 151 214 En 2019 fueron 104 329	Diabetes mellitus 79 038 En 2019 fueron 51 711	COVID-19 71 828
4	Tumores malignos ⁸ 90 645 En 2019 fueron 88 880	Tumores malignos 84 498 En 2019 fueron 41 290	Tumores malignos 48 145 En 2019 fueron 45 264
5	Influenza y neumonía 66 830 En 2019 fueron 51 561	Influenza y neumonía 34 897 En 2019 fueron 17 034	Influenza y neumonía 21 825 En 2019 fueron 10 546
6	Enfermedades del hígado 41 526 En 2019 fueron 40 276	Infecciones parasitarias 27 147 En 2019 fueron 26 296	Enfermedades cerebrovasculares 18 091 En 2019 fueron 17 653
7	Enfermedades cardiovasculares 37 054 En 2019 fueron 36 880	Enfermedades del hígado 36 518 En 2019 fueron 29 880	Enfermedades del hígado 15 588 En 2019 fueron 15 916
8	Infecciones parasitarias 36 219 En 2019 fueron 36 007	Accidentes 25 371 En 2019 fueron 21 758	Enfermedades pulmonares obstructivas crónicas 10 062 En 2019 fueron 11 288
9	Accidentes 22 394 En 2019 fueron 21 524	Enfermedades cardiovasculares 18 961 En 2019 fueron 17 544	Accidentes 6 942 En 2019 fueron 7 791
10	Enfermedades pulmonares obstructivas crónicas 21 972 En 2019 fueron 21 789	Enfermedades pulmonares obstructivas crónicas 11 810 En 2019 fueron 12 980	Insuficiencia renal 6 632 En 2019 fueron 6 329

Figura 2. Las 10 principales causas de muerte en México en el año 2021 reportadas por INEGI (INEGI, 2022)

La microbiota intestinal puede proveer un nuevo camino en la medicina preventiva. La medicina preventiva basada en la microbiota podría reducir el número de defunciones por año, o ser utilizada para tratar enfermedades empleando menos recursos económicos que los tratamientos convencionales. El ahorro en recursos económicos podría hacer que se destinen mayor presupuesto del sector salud para tratar enfermedades cuyo único tratamiento es la medicina curativa.

Sin embargo, se necesita una comprensión exhaustiva de la complejidad de la microbiota intestinal y las relaciones con las enfermedades. Actualmente, no existe un perfil único de microbiota considerado como saludable, ya que la microbiota tiene una diversidad dinámica. Además, las diferencias propias de cada individuo afectan la composición de la microbiota.

Existe evidencia que indica el papel terapéutico de suplementos dietéticos y sus efectos en la salud mediados por la microbiota intestinal. La Clínica Mayo de los Estados Unidos indica lo siguiente (Mayo Clinic, 2024):

“Los probióticos son alimentos o suplementos que contienen microorganismos vivos destinados a mantener o mejorar las bacterias “buenas” (microbiota normal) del cuerpo. Los prebióticos son alimentos (generalmente con alto contenido de fibra) que actúan como nutrientes para la microbiota humana. Los prebióticos se utilizan con la intención de mejorar el equilibrio de estos microorganismos. Los probióticos se encuentran en alimentos como el yogur y el chucrut. Los prebióticos se encuentran en alimentos como los granos integrales, las bananas, las hortalizas de hoja verde, las cebollas, el ajo, la soja y las alcachofas. Además, se agregan probióticos y prebióticos a algunos alimentos y están disponibles como suplementos alimentarios. Se está investigando la relación de la microbiota intestinal con las enfermedades. Los beneficios para la salud de los probióticos y prebióticos actualmente disponibles no se han probado de manera concluyente. Sin embargo, los efectos secundarios son poco frecuentes y la mayoría de los adultos sanos pueden incorporar con seguridad alimentos que contienen prebióticos y probióticos a su alimentación. Las investigaciones futuras pueden conducir a probióticos



Figura 3. Las 10 principales causas de defunción reportadas a nivel mundial hasta diciembre de 2020 (OMS, 2020)

avanzados con mayor potencial para mejorar la salud.” El consumo de suplementos debe ser consultado con un médico para corroborar su bondad.

Constantemente se realizan estudios sobre trasplante de materia fecal, probióticos y prebióticos, así como de microorganismos específicos que se consideran nocivos. Sin embargo, aún faltan muchos pasos de investigación para poder modificar la microbiota intestinal de manera considerable y segura (Nagpal et al., 2014).

El trasplante de materia fecal puede tener riesgos significativos al trasplantar patógenos entre personas, con la posibilidad de que no se encuentren expresados en la persona donadora, pero que lo hagan en la persona receptora por alguna situación de inmunodeficiencia. Por otro lado, los productos probióticos en muchos países no tienen suficientes términos de calidad y seguridad alimentaria (Paule et al., 2018). Lo descrito anteriormente son limitaciones del uso de la microbiota como tratamiento.

Una alternativa, al trasplante de materia fecal y el uso de probióticos, es el uso de bacteriófagos (virus específicos que infectan bacterias). Los bacteriófagos han sido empleados como una solución de la resistencia bacteriana a antibióticos. Estos bacteriófagos podrían utilizarse como moduladores artificiales de la microbiota intestinal. Estos virus podrían ser “entrenados” para atacar específicamente a microorganismos patógenos o bien, reducir la población de ciertas bacterias no deseadas con el fin de modular y reestructurar la microbiota (Paule et al., 2018).

Una publicación mencionada en el primero de estos tres artículos señala (Oseni et al., 2023):

“El papel del microbioma (o la microbiota) humano(a) en la salud está surgiendo y ganando gradualmente atención en el mundo científico por su impacto en la homeostasis, el

metabolismo, la inflamación, las enfermedades, la inmunidad, la hematopoyesis, las funciones neurológicas y cognitivas [72,77,78] (Se encuentran citadas al final de las referencias). El microbioma humano es la acumulación de genes y genomas microbianos en el cuerpo y la suma de todas las microbiotas que residen en o dentro de los tejidos humanos, incluidos los biofluidos, en las proximidades de los sitios anatómicos en los que residen [79]. La naturaleza de la microbiota en los distintos tejidos y órganos del cuerpo se ha asociado con el estado de salud del paciente y podría clasificarse como microbioma bueno o microbioma malo (Figuras 4a,b).”

“Los órganos con un buen microbioma tienen un ecosistema microbiano que exhibe simbiosis para prevenir el crecimiento excesivo de organismos patógenos que podrían causar enfermedades, mientras que ocurre lo contrario con los órganos con un mal microbioma. La composición de la microbiota (virus, bacterias, arqueas, hongos, bacteriófagos y protozoarios específicos de un lugar o hábitat particular del cuerpo en cada tejido humano) varía debido a varios factores, incluidos factores genéticos, la colonización durante la concepción, el método de parto al nacer, el estilo de vida del hospedero o anfitrión, la exposición a antibióticos, medicamentos, la ingesta dietética, las creencias culturales y las enfermedades [80]. La disbiosis microbiana se produce por desequilibrios en la dinámica de la microbiota de los tejidos, provocados por factores internos y externos, como la exposición a agentes químicos, cambios en la dieta o el estilo de vida, el tabaquismo, el envejecimiento y los desequilibrios hormonales, entre otros. La dinámica de la comunidad de microbiota de cada tejido fluctúa según los cambios ambientales que ocurren en el tejido específico en el que residen los microorganismos [81]. Massari et al. (2019) observaron una disparidad relacionada con el sexo en la microbiota urinaria. Observaron una gran abundancia de *Lactobacillus* y *Gardnerella* en las mujeres, mien-

tras que *Corynebacterium*, *Staphylococcus* y *Streptococcus* son la microbiota urinaria más abundante en los hombres [81].”

“La evidencia de una gran cantidad de estudios indica que los microorganismos patógenos son responsables de más del 20% de los casos de cáncer [82,83]. En algunos casos, se demostró que la microbiota influye en el desarrollo del cáncer al modular las señales de inflamación e inducir inestabilidad genómica de las células hospederas o anfitrionas [84,85]. En sus estudios, ambos grupos de investigación proporcionaron evidencia fundamental para demostrar que la microbiota intestinal trasplantada puede influir en el desarrollo del

cáncer y que la microbiota de ratones podría manipularse para favorecer el desarrollo de tumores mediante disbiosis microbiana. En el estudio de Zackular et al. (2013), se intervinieron ratones libres de gérmenes con microbiota intestinal de ratones donantes con tumores y los efectos se compararon con la microbiota intestinal de ratones sanos sin tumores. Los ratones convencionalizados con microbiota mostraron un aumento del doble en la carga/desarrollo tumoral en relación con aquellos que recibieron el trasplante de microbiota intestinal de ratones donantes sanos. Dado que la glándula prostática se encuentra próxima a la vejiga y al tracto urinario, muchos estudios han propuesto que

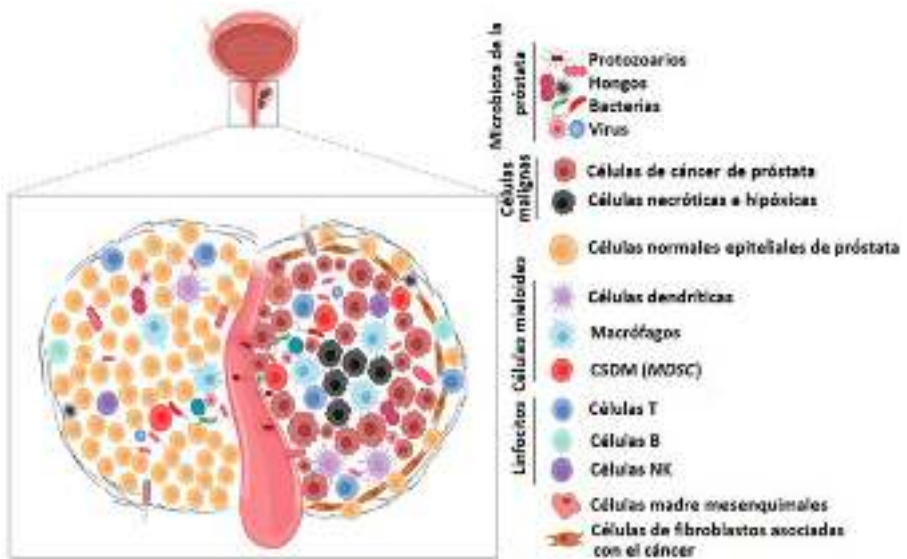


Figura 4a. Ilustración del microambiente de un tumor de próstata mostrando sus subpoblaciones y microbiota donde CSDM son células supresoras derivadas de mieloides [Creada por los autores con Biorender.com]

(traducida de Oseni et al., 2023)

los microbios y/o estímulos inflamatorios del tracto urinario podrían promover la tumorigénesis en la glándula prostática [81]. Una de las principales causas de la inflamación de la próstata son las bacterias patógenas. La prostatitis bacteriana suele estar asociada a la infección por especies de *Enbacteriaceae*,

incluida *E. coli*. También se han identificado, aislado y caracterizado otros uropatógenos utilizando varias técnicas convencionales y moleculares. Se han realizado estudios destinados a vincular la inflamación crónica y la disbiosis microbiana urinaria con el PCa, con resultados mixtos [86].”

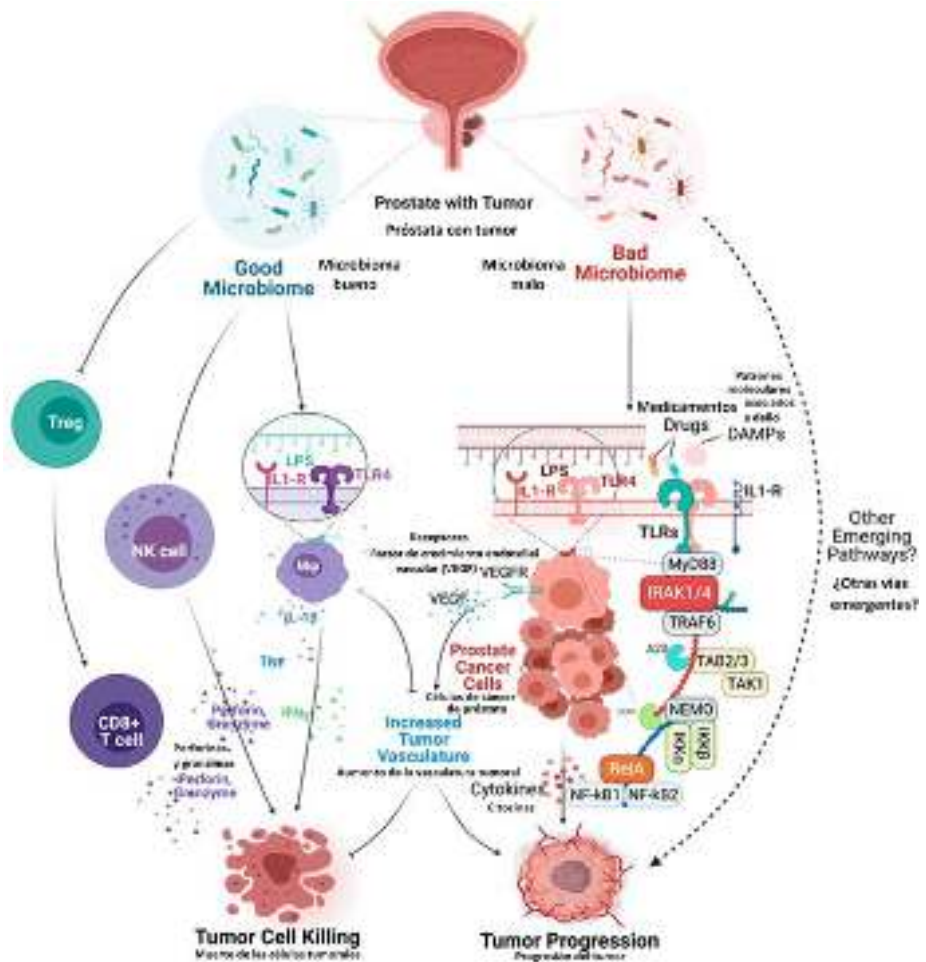


Figura 4b. Ilustración del microbioma prostático y cómo se relaciona con los mecanismos involucrados en la respuesta inmune antitumoral versus la respuesta de la progresión tumoral en el microambiente del tumor de próstata (Células T reguladoras (Treg) y células asesinas naturales (NK) con las células T y CD8+ pueden liberar sus gránulos, matar una célula infectada, luego moverse a un nuevo objetivo y matar nuevamente, con frecuencia conocido como asesinato en serie) [Creada por los autores con BioRender.com] (Oseni et al., 2023)

“Utilizando pirosecuenciación ultraprofunda, Cavarretta et al. (2017, 2018) descubrieron que la abundancia microbiana de algunas especies de bacterias es específica del tumor y puede variar entre las diferentes zonas arquitectónicas del órgano que alberga el tumor [87]. En su estudio, se evaluó la abundancia microbiana relativa de muestras de tejido prostático tumoral, no tumoral y peritumoral recolectadas de 16 pacientes caucásicos con cáncer de próstata después de una prostatectomía radical y se encontró que difería entre las zonas de transición y periférica de la próstata [88]. El filo dominante identificado fue Actinobacteria, grampositiva, mientras que los géneros más abundantes fueron *Propionibacterium*, seguido de Firmicutes y Proteobacteria en los tres tipos diferentes de muestras de tejido prostático analizados. Sin embargo, *Staphylococcus* spp. fue común en los tejidos tumorales y peritumorales en comparación con las muestras de tejido no tumoral [88]. Además, los hombres con cáncer de próstata con biopsia positiva tienen una mayor proporción de bacterias que a menudo se asocian con infecciones urogenitales, como ETS o enfermedades transmitidas sexualmente (STDs, sexually transmitted diseases) e ITU o infecciones del tracto urinario (UTIs, urinary tract infections), en comparación con los sujetos con biopsia negativa [60]. Se ha informado de una gran abundancia de bacterias, como *Varibaculum cambriense*, *Streptococcus anginosus*, *Anaerococcus obesiensis*, *Actinobaculum schaalii*, *Anaerococcus lactolyticus* y *Propionimicrobium lymphophilum*, en biopsias de tejido prostático [60]. Se informó que *Mycoplasma genitalium* era común en pacientes con cáncer de próstata en relación con los pacientes con hiperprostatia benigna (BPH benign prostatic hyperplasia) [89]. En pacientes con cáncer de próstata, las bacterias asociadas con las vías del metabolismo de los carbohidratos también eran abundantes, mientras que las bacterias asociadas con el folato, la riboflavina y la biotina eran menos abundantes [90].

... La disbiosis microbiana se ha relacionado

con varias enfermedades y se ha informado que es responsable de respuestas mixtas en función del paciente a diferentes estrategias terapéuticas, incluidas la radioterapia, la quimioterapia, la fitoterapia y la inmunoterapia [96]. Se ha sugerido una gran cantidad de mecanismos que causan disbiosis microbiana (microbioma deficiente) que podría conducir al desarrollo y la progresión del cáncer de próstata (Figura 4b). Una de las hipótesis notables es que la disbiosis microbiana fomenta la abundancia de microbios patógenos, lo que resulta en inflamación crónica y asalto de citocinas. Esto conduce a la sobreproducción y sobreexpresión de oncoproteínas, metabolitos oncogénicos y productos de estrés oxidativo que predisponen al desarrollo y la supervivencia del cáncer. Los autores observaron que los ratones infectados con *E. coli* desarrollaron prostatitis bacteriana tanto aguda como crónica, mientras que los ratones de control que recibieron solución salina amortiguada con fosfatos (PBS, phosphate buffered saline solution) no tuvieron infecciones ni inflamación de próstata. El resultado de su estudio sugirió que la dosis, la infectividad y la duración de la infección con el patógeno determinan el grado de carcinogénesis impulsada por la inflamación crónica. Por ejemplo, en su estudio, los ratones infectados durante 5 días mostraron signos de inflamación aguda con infiltración de neutrófilos y restos necróticos epiteliales en el lumen glandular prostático, mientras que los ratones infectados durante 12 semanas mostraron evidencia de inflamación crónica con infiltrados inflamatorios densos en el estroma. El epitelio prostático en esta etapa mostró diversos grados de hiperplasia atípica con aumento de las capas de células epiteliales y atipia citológica. Sin embargo, a las 26 semanas de infección, se observó una displasia pronunciada y reactiva en los ratones. Las lesiones observadas en los órganos de la próstata de los ratones se parecen tanto a la neoplasia intraepitelial prostática (PIN, prostatic intraepithelial neoplasia) como a la displasia de alto grado. Este hallazgo [97]

es uno de los muchos estudios que sugieren una posible conexión entre la inflamación crónica y la neoplasia prostática; este estudio mostró en particular que la inflamación crónica promueve la atipia glandular prostática focal. En general, estos hallazgos proporcionan evidencia para respaldar la proposición de que la dinámica molecular y microbiana de la próstata, así como del intestino, influyen en el desarrollo, la progresión y la respuesta al tratamiento de los tumores de próstata. Si bien es más fácil concluir que los cambios en la abundancia microbiana de la microbiota prostática contribuyen a la progresión del cáncer, existe la posibilidad de que su relación sea simbiótica, en la que las células tumorales experimentan una reprogramación metabólica para inducir cambios en su microambiente con el fin de estimular el crecimiento de microbios promotores de tumores. Un ejemplo es una mayor abundancia de Lactobacillales o bacterias de ácido láctico (LAB, lactic acid bacteria), incluidas bacterias del género *Lactobacillus*, *Aerococcus*, *Enterococcus*, *Leuconostoc*, *Streptococcus*, *Carnobacterium*, *Tetragenococcus*, *Vagococcus*, *Sporolactobacillus*, *Weissella*, *Oenococcus* y *Pediococcus* alrededor de los sitios tumorales [98]. Estos microorganismos tienen una mayor tolerancia al pH bajo o la naturaleza ácida del microambiente tumoral y podrían sobrevivir a otros no LAB en el entorno tumoral. La presencia de la microbiota y el entorno con exceso de lactato puede proporcionar mecanismos de señalización que favorezcan la producción de más factores promotores de tumores. Si bien esto sigue siendo una hipótesis y muy discutible, otros estudios han sugerido que la presencia de LAB puede tener efectos anti-tumorales en el cáncer colorrectal [99,100]. Se necesitarán más estudios para confirmar esta hipótesis, especialmente en el caso de los tumores de próstata” (Oseni et al., 2023).

“El término ‘stemness’ se utiliza para describir la naturaleza fenotípica y las características funcionales de las células pluripotentes, similares a células madre y progenitoras capaces

de experimentar autorrenovación, proliferación y transdiferenciación a través de un proceso conocido como plasticidad [257]. Es importante destacar que el carácter de ‘stemness’ es una característica indispensable de las células troncales o madre cancerosas, CSC, que se ha confirmado *in vitro* e *in vivo*. Se han adoptado varios marcadores basados en células para identificar, aislar y diferenciar las células madre cancerosas del cáncer de próstata, PCSC, de otras subpoblaciones tumorales [258]. Las PCSC se pueden aislar de muestras de tumores de próstata y líneas celulares a través de técnicas de clasificación de células activadas por fluorescencia (FACS, fluorescence activated cell stem) y clasificación de células activadas por magnetismo (MACS, magnetism activated cell stem) [259]. Los marcadores de CSC comúnmente utilizados son CD44, CD133, integrina 21 y CD24, entre otros [260]. La combinación de dos o más de estos marcadores es más precisa y eficiente para identificar y aislar poblaciones de PCSC y progenitores. Por ejemplo, un estudio mostró que las PCSC CD133+ aisladas de tejidos de CaP también muestran una mayor expresión de integrina 1 e integrina 21 [256]. En otro estudio, se identificaron PCSC supuestamente en tumores primarios de próstata utilizando una combinación de marcadores celulares: CD44+/ 21high/CD133+ [261]. Curiosamente, se descubrió que las células madre que expresaban CD44+/ 21high/CD133+ mostraban una mayor tumorigénesis y autorrenovación en relación con las células CD44-/ 21low/CD133-. Sorprendentemente, también se aislaron PCSC formadoras de esferas no adherentes con fenotipos CD44+/ 21high/CD24+ de líneas celulares sensibles a los andrógenos (AR+) y CRPC (AR-) cultivadas en medios sin suero y matriz Matrigel reducida en factores de crecimiento. Se demostró que presentan una tumorigenicidad mejorada *in vivo* [252]” (Oseni et al., 2023).

Finalmente, Oseni et al. (2023) proponen un posible esquema de curación para pacientes con cáncer de próstata (Figura 5).

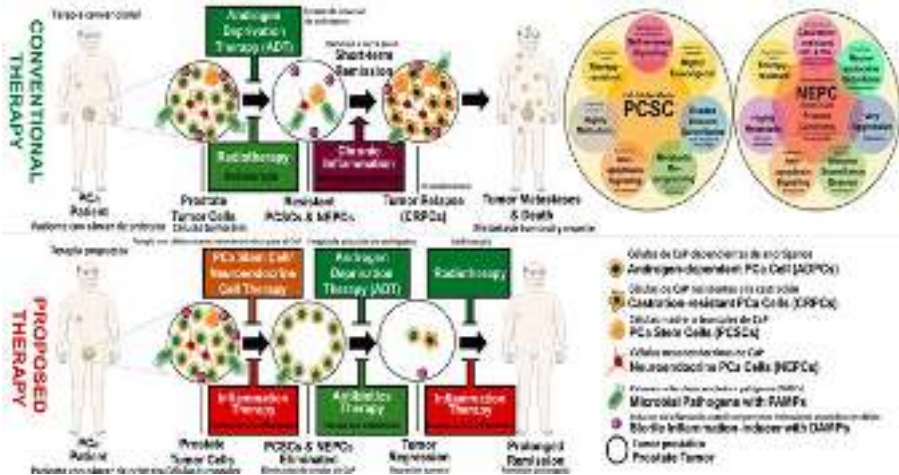


Figura 5. Imagen ilustrativa que sirve para demostrar de forma esquemática de una de las posibles estrategias terapéuticas novedosas que podrán explorarse para el tratamiento del cáncer de próstata, CaP, provocado por inflamación crónica, como se prevé en el laboratorio de los autores (Oseni et al., 2023)

[Completado con algunas publicaciones: Chandrasekar et al., 2015; Harguindey, 2004; López-Marín y Valdemar-Aguilar, 2020; Pedroza-Pacheco et al., 2013; Scrimini et al., 2015; Torres-Pérez, 2021; Yamada y Beltrán, 2021]

Estas Figuras 4b y 5 presentan un acercamiento a un enorme problema, el cáncer de próstata. Es una interesante propuesta que debería ser estudiada por oncólogos para alargar la vida de las personas que sufren de esta afección maligna.

Otra visión de esta misma afección viene dada por Kustrimovic et al. (2023), en el segundo artículo, quienes señalan en su resumen cuestiones que complementan lo señalado en el artículo anterior (Oseni et al., 2023):

“Desde la creación del Proyecto del Microbioma Humano, han surgido cada vez más pruebas del papel del microbioma en la salud y la enfermedad humanas. Estudios recientes sugieren que las alteraciones en la composición de la microbiota (disbiosis) pueden desempeñar un papel esencial en la aparición, el desarrollo y el pronóstico del cáncer de próstata (CaP), que sigue siendo la segunda neoplasia maligna masculina más frecuente en todo el mundo. Los avances actuales en tecnologías biológicas,

como la secuenciación de alto rendimiento, la transcriptómica y la metabolómica, han permitido la investigación sobre la firma del microbioma intestinal, urinario e intraprostático y la correlación con la inflamación local y sistémica, la respuesta inmunitaria del huésped y la progresión del CaP. Varias especies microbianas y sus metabolitos facilitan la insurgencia del CaP a través de la mutagénesis mediada por genotoxinas o impulsando la inflamación que promueve el tumor y la inmunovigilancia disfuncional. Sin embargo, el impacto del microbioma en el desarrollo, la progresión y la respuesta al tratamiento del CaP es complejo y debe comprenderse por completo. Esta revisión aborda el conocimiento actual sobre la interacción huésped-microorganismo y el riesgo de cáncer de próstata, y brinda información novedosa sobre los mecanismos del microbioma intraprostático, intestinal y urinario que conducen a la carcinogénesis del cáncer de próstata y la respuesta al tratamiento. En este artículo, se brinda una descripción detallada de los

cambios en la dieta, el microbioma intestinal y los enfoques terapéuticos emergentes relacionados con el microbioma y el cáncer de próstata. Una mayor investigación sobre el microbioma relacionado con la próstata y ensayos clínicos a gran escala que prueben la eficacia de los enfoques de modulación de la microbiota pueden mejorar los resultados de los pacientes y, al mismo tiempo, llenar el vacío en la literatura sobre las interacciones mecánicas entre microorganismos, células cancerosas y sistemas inmunitarios.”

Y, en el tercer artículo, de Faustino-Rocha et al. (2023), se plantearon como pregunta de investigación qué modelos están disponibles para el estudio y la deseable solución del cáncer del que causó 10 millones de decesos en 2020 (1 de cada 6 personas fallecidas fue por esta causa) según la OMS (WHO, 2020) [22]. Obviamente, hay muchos diferentes tipos de cáncer y se plantea en la sociedad realizar investigación para diseñar mejores estrategias de diagnóstico temprano, un mejor método de tratamiento que involucre una mejor calidad de vida y supervivencia de los pacientes. Hay modelos *in vitro* e *in vivo*. Y, los autores seleccionaron el estudio del cáncer de próstata, CaP, usando modelos *in vivo* (iniciados con ratas inyectadas con benzopireno en la próstata en 1937 que no desarrollaron metástasis [23]. En 1945 se usó otra estirpe de ratas [24] que ya tuvo metástasis en huesos. El status actual tiene una incidencia del 100% en tumores garantizados y sensibles a los andrógenos (54). Con el nivel de conocimiento de siglo XXI, los avances en el estudio del CaP utilizando modelos 3D y de órgano en chip han sido pocos y necesitan más investigación y mayor financiación. Su segundo objetivo fue estudiar las terapias que se han desarrollado en el mundo. Existe una variedad de enfoques que deben considerarse, que incluyen vigilancia activa, espera vigilante, cirugía, radiación, quimioterapia, terapia hormonal e inmunoterapia (55, 57) (Figura 2). Todos estos enfoques se pueden utilizar solos o en combinación.

“La vigilancia activa consiste en el seguimiento del cáncer mediante análisis de sangre, análisis de sangre de PSA y examen rectal digital. Además, se pueden realizar biopsias de próstata y pruebas de imagen. Esta estrategia se aplica generalmente a pacientes con cáncer de próstata localizado y bajo riesgo de que el cáncer crezca o se propague fuera de la próstata. La espera vigilante se utiliza en pacientes con enfermedad de bajo riesgo y de crecimiento lento, pacientes con otras enfermedades y aquellos con una expectativa de vida limitada. Por lo general, no se realizan pruebas de rutina en estos pacientes [55, 57]. Existen diferentes abordajes quirúrgicos, según el estadio de la enfermedad y el estado del paciente. La prostatectomía radical, por laparoscopia o asistida por robot, extirpa toda la glándula prostática y las vesículas seminales [58]. La resección transuretral de la próstata se realiza para extirpar la parte interna de la próstata que rodea la uretra y aliviar la dificultad para orinar [59]. Las técnicas mínimamente invasivas, con incisiones mínimas o utilizando instrumentos diminutos en la uretra, se utilizan cada vez más para tratar el cáncer de próstata o aliviar los síntomas. La radioterapia en el cáncer de próstata incluye, por ejemplo, la radioterapia externa, la braquiterapia o el uso de radiofármacos. Los radiofármacos son una terapia emergente contra el cáncer que administra radioterapia directamente a las células cancerosas [60]. Específicamente en el conjunto del cáncer de próstata, a finales de marzo de 2022 la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) aprobó el 177Lu-PSMA-617 para tratar a pacientes con cáncer de próstata metastásico que han sido tratados con inhibidores de la vía del receptor de andrógenos (AR) y quimioterapia basada en taxanos [61]. Este fármaco combina un compuesto de focalización con un radioisótopo terapéutico. Después de su administración, se une a las células del cáncer de próstata que expresan el antígeno de membrana específico de la próstata (PSMA), una proteína transmembrana y,

una vez unido, las emisiones del radioisótopo dañan las células tumorales alterando su capacidad de replicarse y desencadenando la muerte celular [62-64]. La hormonoterapia es una de las áreas más avanzadas en las que se han desarrollado nuevos fármacos, como la apalutamida y la darolutamida. La apalutamida, un inhibidor de la señalización de los andrógenos, ha sido estudiada y fue aprobada por la FDA en 2018 y por la Agencia Europea de Medicamentos (EMA) en 2019 [65-67]. Se utiliza para tratar el cáncer de próstata resistente a la castración no metastásico [CRPCa] y el PCa metastásico sensible a las hormonas en combinación con la terapia de privación de andrógenos [65]. La darolutamida es un inhibidor del receptor de andrógenos utilizado en el tratamiento del CRPCa no metastásico en combinación con cirugía o castración médica, aprobado en EE. UU. en 2019 y en la Unión Europea en 2020 [68-71].” (Faustino-Rocha et al., 2023)

“Otra terapia emergente para el cáncer de próstata se denomina electroporación focal irreversible. Esta tecnología utiliza una corriente eléctrica directa de bajo voltaje que daña permanentemente la membrana celular y conduce a la muerte celular, preservando las estructuras prostáticas circundantes [72-74]. La selectividad tisular, la toxicidad reducida en las estructuras anatómicas vitales que rodean las lesiones prostáticas y la preservación de las funciones urinarias y sexuales son las principales ventajas de esta técnica [75]. Además, esta técnica es mínimamente invasiva en contraste con otras terapias, permite precisión en la focalización de las células cancerosas y el tiempo de recuperación es corto [74, 76]. Sin embargo, esta técnica aún se encuentra en una etapa temprana de desarrollo y aún no hay muchos estudios científicos que la comparen con enfoques más tradicionales, pero los resultados parecen prometedores [74, 77-79]. La inmunoterapia es una terapia prometedora para el cáncer de próstata que utiliza el propio sistema inmunológico

de los pacientes para reconocer y matar las células cancerosas. Sipuleucel-T, una vacuna basada en células, es la única inmunoterapia aprobada por la FDA para el cáncer de próstata resistente a la castración asintomático o mínimamente sintomático [80, 81]. Sin embargo, todavía no está disponible en Europa [82, 83]. El tratamiento implica el uso de células inmunes del paciente estimuladas para dirigirse al antígeno fosfatasa ácida prostática [80]. Otras terapias de vacunas se están probando en ensayos clínicos, como Prostavac [84]. Los inhibidores de puntos de control inmunitarios son otro tipo de inmunoterapia que bloquea la unión de las proteínas de puntos de control con sus proteínas asociadas, lo que permite que el sistema inmunitario, es decir, las células T, ataquen y destruyan las células cancerosas. Pembrolizumab es un fármaco que se dirige a la vía PD-1/PD-L1 y es el único aprobado por la FDA para el cáncer de próstata avanzado que presenta alta inestabilidad de microsatélites, deficiencia en la reparación de desajustes del ADN o alta carga mutacional tumoral [85-87]. Hay más estudios en curso y ensayos clínicos con estos fármacos inhibidores de puntos de control inmunitarios, pero cuyos resultados aún no permiten su aprobación por las autoridades competentes y su comercialización [88-91].” (Faustino-Rocha et al., 2023).

“Los modelos animales han sido vitales para el descubrimiento, desarrollo y aprobación de nuevos fármacos para el tratamiento del cáncer, al permitir evaluar su seguridad, toxicidad, farmacodinámica, farmacocinética y eficacia. Determinar la eficacia y la seguridad es fundamental durante las fases iniciales del descubrimiento y desarrollo de fármacos y, en última instancia, para su aprobación y comercialización. Algunos de los medicamentos aprobados por la FDA o la EMA, y enumerados anteriormente, se probaron en modelos de roedores [92-102].” Estos investigadores concluyeron lo siguiente: “Los investigadores deben elegir

cuidadosamente los modelos para cualquier ensayo determinado, teniendo en cuenta el objetivo del estudio, los costos asociados y las ventajas y desventajas de cada modelo. Aunque hay varios modelos disponibles para estudios de CaP, los modelos de roedores siguen siendo los más utilizados. A pesar de sus desventajas, los modelos de ratas han proporcionado una gran cantidad de información sobre la biopatología del CaP, lo que ha permitido una mejor comprensión de la enfermedad y ha permitido desarrollar terapias más eficaces. El modelo inducido químicamente y por la hormona CaP es muy complejo y requiere mucho tiempo y trabajo, pero induce con éxito el desarrollo de tumores de CaP dependientes de hormonas e histológicamente similares a los desarrollados por los hombres, lo que permite la traducción de datos. Sin duda, en el futuro los modelos animales seguirán siendo una herramienta fundamental en el estudio del CaP y en el desarrollo de nuevas aproximaciones terapéuticas, ya que sólo los animales de laboratorio permiten el estudio de varias variables simultáneamente.” (Faustino-Rocha et al., 2023).

Antes de entrar en materia sobre los probióticos y prebióticos se presenta un pequeño resumen de un artículo sobre las causas de la hipertensión (Gutiérrez et al., 2019). Su investigación resumida es la siguiente:

“La resistencia a la insulina desempeña un papel clave en la patogenia de la diabetes tipo 2 y también está relacionada con otros problemas de salud como la obesidad, la hipertensión y el síndrome metabólico. El desequilibrio entre las acciones vasculares de la insulina a través de las vías de señalización de la fosfatidilinositol 3-quinasa (PI3K) y la proteína quinasa activada por mitógenos (MAPK) durante los estados de resistencia a la insulina da como resultado una alteración de las vías endoteliales PI3K/eNOS y un aumento de las vías MAPK/endotelina 1, lo que conduce a una disfunción endotelial y

una vasoconstricción anormal (hipertensión). ... Estas quinzas representan objetivos farmacológicos potenciales en patologías asociadas a disfunción vascular y manejo anormal de Ca²⁺ ... agrupadas en el llamado síndrome metabólico (Ford, 2005), ... en las que estas vías de señalización están profundamente deterioradas. ... Se evaluaron las respuestas al CaCl₂ en arterias activadas con fenilefrina (PE) y mantenidas en una solución libre de Ca²⁺, en ausencia y presencia del antagonista selectivo de los canales de Ca²⁺ de tipo L nifedipina, ácido ciclopiazónico (CPA) para bloquear la liberación intracelular de Ca²⁺ del retículo sarcoplásmico (SR) o inhibidores específicos de PI3K, ERK-MAPK o PKC. ... Tanto la [Ca²⁺]_i como las respuestas contráctiles fueron inhibidas por nifedipina mientras que CPA abolió la movilización intracelular de Ca²⁺ y redujo modestamente la entrada de Ca²⁺ sugiriendo que la vasoconstricción 1-adrenérgica depende en gran medida de la afluencia de Ca²⁺ a través del canal de Ca²⁺ de tipo L y en menor medida a través de los canales de Ca²⁺ operados por depósito. La inhibición de ERK-MAPK no alteró la movilización intracelular de Ca²⁺ pero redujo en gran medida la entrada de Ca²⁺ de tipo L provocada por PE sin alterar la vasoconstricción. La resistencia a la insulina desempeña un papel clave en la patogénesis de la diabetes tipo 2 y también se asocia a otras anomalías metabólicas y cardiovasculares como la obesidad, la dislipidemia y la hipertensión.”

Esta contribución es interesante porque está ligada al primer artículo en su Figura 4b (Oseni et al., 2023). Se llama ‘TLR4 en la encrucijada de los nutrientes, la microbiota intestinal y la inflamación metabólica’ (Velloso et al., 2015):

“La obesidad se acompaña de la activación de una actividad inflamatoria de bajo grado en tejidos metabólicamente relevantes. Los estudios han demostrado que la resistencia a la insulina asociada a la obesidad resulta de la focalización inflamatoria y la inhibición de proteínas clave de la vía de seña-

lización de la insulina. Se han identificado al menos tres mecanismos aparentemente distintos (estrés del retículo endoplásmico, activación del receptor tipo toll (TLR) 4 y cambios en la microbiota intestinal) como desencadenantes de la inflamación metabólica asociada a la obesidad; Por lo tanto, se espera que representen objetivos potenciales para el tratamiento de la obesidad y sus comorbilidades. Aquí, revisamos los datos que colocan a TLR4 en el centro de los eventos que conectan el consumo de grasas dietarias con la inflamación metabólica y la resistencia a la insulina. Los cambios en la microbiota intestinal pueden conducir a una menor integridad de la barrera intestinal, lo que lleva a una mayor fuga de lipopoliglúcidos y ácidos grasos, que pueden actuar sobre TLR4 para activar la inflamación sistémica. Los ácidos grasos también pueden desencadenar estrés del retículo endoplásmico, que puede ser estimulado aún más por la comunicación cruzada con TLR4 activo. Por lo tanto, los datos actuales respaldan una conexión entre los tres desencadenantes principales de la inflamación metabólica, y TLR4 surge como un vínculo entre todos estos mecanismos.” (Velloso et al., 2015).

Esto indica que no solamente participan receptor tipo Toll TLP 4 en el cáncer de próstata sino también en la resistencia a la insulina con la microbiota.

Inmunomodulación con probióticos y prebióticos

Considerando positiva la importancia del consumo de Lactobacillus para revertir la disbiosis intestinal ya que hace veinte años se consideró como una señal de posible disbiosis intestinal una proporción baja de estas bacterias (Hart et al., 2004), existen microorganismos de la microbiota intestinal que tienen efectos inmunomoduladores y, concretamente, bacterias ácido-lácticas, como propusieron Hart et al. (2004). Estos autores plantearon que el con-

sumo de Lactobacillus ayudaba en la disminución de células T citotóxicas y la respuesta de células B, impulsada por Th1.

Ezendam et al. (2006) realizaron estudios con el consumo de Lactobacillus casei Shirota, Durante 8 días suministraron a ratones con Lactobacillus casei Shirota. Después de la eutanasia se realizaron observaciones en el bazo, el timo y los ganglios linfáticos mesentéricos. Los resultados mostraron que los órganos de los ratones que consumieron Lactobacillus perdieron algo de masa. Sin embargo, esta pérdida no fue estadísticamente significativa. La única excepción fue el bazo. Este órgano presentó un aumento ligero. Este cambio pudo deberse al aumento de la producción de células. Los efectos inmunomoduladores del consumo de Lactobacillus casei Shirota en ratones fueron muy sutiles. La posible explicación es que los efectos de modulación dependen del estado inmune de las ratas. Los efectos positivos inmunomoduladores causados por Lactobacillus casei se aprecian mejor en individuos que están teniendo un desequilibrio Th1/Th2 y no en ratas sanas (Ezendam et al., 2006).

Otros problemas de salud en ratas Wistar muestran efectos más significativos al consumir probióticos como se observó en el estudio de Messori et al. (2013). En este estudio se alimentaron a ratas Wistar con probióticos (Bacillus subtilis) durante 44 días. A estas ratas se les indujo periodontitis mediante una ligadura de algodón en los dientes. Esta enfermedad es una infección en las encías, la cual daña el tejido blando y destruye el hueso que sostiene los dientes. Tras el consumo de 30 días de Bacillus subtilis se observó que las ratas con periodontitis redujeron su pérdida ósea (contra un control con periodontitis sin consumo de probióticos). Se cree que lo anterior es debido a la reducción de algunas citocinas proinflamatorias, activación de macrófagos y natural killers, NK, estimulación de producción de glóbulos blancos y estimulación de células dendríticas (presentadoras de antígenos). Este

tipo de respuesta de modulación reacciona de modo similar al de la infección de las encías, pero sin generar la destrucción periodontal, siendo un efecto benéfico en la modulación inmune (Messora et al., 2013). Además, este estudio confirmó que la periodontitis afecta la estructura intestinal, por lo que, en conjunto con las respuestas inflamatorias, generan aún más evidencia de la respuesta inmunomoduladora de los probióticos. Una posible explicación es que el consumo de probióticos mejora la microbiota intestinal, desplazando microorganismos patógenos y por consiguiente limitando la respuesta inmune del intestino, consiguiendo una modulación benéfica en las enfermedades en las que la inflamación sistémica se vuelve un problema (Messora et al., 2013).

Delgado-Venegas (2018) probó 2 cepas de *Lactobacillus lactis*, una cepa silvestre y una cepa recombinante (cepa bacteriana con ADN externo añadido con el fin de otorgarle una nueva capacidad de expresión genética) que secreta IL-22, Interleucina 22, con el fin de expresar mayormente el receptor de IL-22 en el intestino en un modelo de fibrosis hepática (enfermedad que genera una cicatrización en el tejido del hígado, generando un flujo sanguíneo reducido y la pérdida de la función tisular del mismo) de ratas Wistar. Esta fibrosis fue inducida con CCl4 y se utilizó el probiótico como un tratamiento preventivo. Como resultado se observó que ambas cepas disminuyeron el daño en el hígado ocasionado por la fibrosis hepática, pero sin una recuperación completa, aunque con una mejora considerable del parénquima (término histológico que hace referencia a las células esenciales de un órgano, en este caso el hígado). También se observó la disminución de los niveles de expresión de la citocina proinflamatoria IL-1, la citocina fibrogénica TGF- y el colágeno a nivel hepático. Estas observaciones fueron realizadas mediante estudios histológicos. Todos estos resultados muestran que el consumo de probióticos (*Lactobacillus lactis*) tiene efecto inmunomodulador en modelos animales con una enfermedad proinflamatoria. La IL-22 es una interleucina producida principal-

mente por células T activadas y células NK, y se crea como una reacción defensiva a infecciones o lesiones causadas por agentes químicos o físicos. La cepa recombinante al producir IL-22 brinda una protección extra a tejidos epiteliales como los de pulmón, intestino, hígado, etc. (Delgado-Venegas, 2018). También se ha estudiado el efecto de los probióticos efecto sobre la estimulación del sistema inmune en los casos en los que este se encuentra suprimido en algún grado (Delgado-Venegas, 2018). Otros autores también estudiaron a esta citocina IL-22 (Yamamoto-Furusho et al., 2016), la cual muestra algunos polimorfismos que han sido asociados con procesos inflamatorios, como artritis reumatoide y psoriasis vulgar.

Ruiz-Iglesias et al. (2020) detallaron los cambios que el ejercicio agotador puede presentar en ratas de estirpe Wistar a mediano plazo. Los autores mencionan que el ejercicio agotador altera funciones inmunológicas y gastrointestinales, especialmente las asociadas al tejido linfóide asociado con mucosas. Esto se observó en ratas Wistar que fueron sometidas a un entrenamiento de alta intensidad (corriendo en una cinta rodante) durante 5 días a la semana, por 5 semanas. Las ratas que realizaron ejercicios extenuantes mostraron un cuerpo más largo, un aumento de masa magra y un menor consumo de alimento. Lo anterior indica una mayor eficiencia alimentaria que los animales sedentarios (control). Se monitoreó el tejido linfóide asociado con mucosas mediante los niveles de secreción de IgA. Se observó un descenso de IgA en todo el tejido de la glándula salival submaxilar (Ruiz-Iglesias et al., 2020). El estudio mostró un deterioro de la expresión de algunas proteínas de la unión estrecha (componentes de las uniones célula-célula que forman una barrera), lo cual puede explicar el aumento de la permeabilidad intestinal. También se observaron modificaciones en las secreciones del ganglio linfático mesentérico mostrando modificaciones en la función y composición de los linfocitos, reduciendo su capacidad de proliferación y potenciando la secreción de interferón- ν . Esto muestra que el ejercicio intenso aún sin agota-

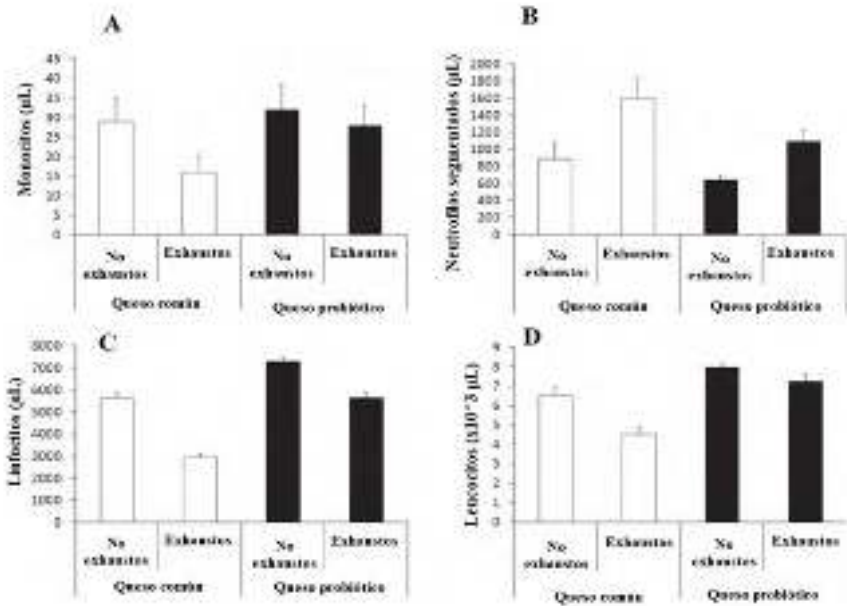


Figura 6. Comparación de la cantidad de: (A) Monocitos, (B) Neutrófilos, (C) Linfocitos y (D) Leucocitos de ratas que consumieron queso común y queso con probiótico (modificado de Lollo et al., 2012)

miento altera el tejido linfoide asociado con el intestino, la mucosa y la barrera epitelial del intestino (Ruiz-Iglesias et al., 2020).

Lollo et al. (2012) estudiaron el efecto del consumo de probióticos sobre los efectos ocasionados del ejercicio físico intenso, empleando ratas Wistar distribuidas en 4 grupos, 2 con probiótico y 2 sin probiótico durante 14 días. Posteriormente, un grupo sin probiótico y uno con probiótico fueron sometidos a ejercicio físico intenso durante 2 horas y los otros dos grupos (uno con y otro sin probióticos) fueron los controles sin ejercicio extenuante. El ejercicio intenso da como resultado un aumento en el estrés que provoca inmunosupresión en atletas (Lollo et al., 2012). El grupo con probióticos consumió un queso brasileño que contiene *Lactobacillus acidophilus* LA14 y *Bifidobacte-*

rium longum BL05. En contraste, el grupo sin probióticos consumió un queso que no contenía las bacterias previamente mencionadas. Tras el agotamiento físico las ratas tuvieron una eutanasia humanitaria y se midieron diversos metabolitos en sangre, así como la cantidad de monocitos, linfocitos, recuentos de neutrófilos y leucocitos. El resultado de estas mediciones tras el ejercicio exhaustivo fue una disminución significativa en los recuentos de monocitos en las ratas que no consumieron queso probiótico. En las ratas que consumieron queso con probióticos hubo una disminución menor (22 contra 48% el grupo que consumió queso común) (Lollo et al., 2012) (ver Figura 6).

La disminución de neutrófilos y la elevación de linfocitos es una relación que se ha propuesto como un indicador rápido de estrés, tensión

y estado inflamatorio. En este estudio las ratas alimentadas con queso con probióticos y que hicieron ejercicio tienen una proporción de neutrófilos/linfocitos 2.2 veces mayor en comparación con el grupo que no hizo ejercicio, mientras que las ratas alimentadas con queso común y que hicieron ejercicio tuvieron una proporción 3.5 veces mayor. Lo deseable es que la proporción de neutrófilos/linfocitos sea baja ya que una proporción elevada indica estrés. Por lo tanto, la ingestión de probióticos fue capaz de aumentar los niveles de antioxidantes del plasma, neutralizando especies reactivas de oxígeno. Además los probióticos generan inmunomodulación con el sistema inmune gastrointestinal (Lollo et al., 2012).

La idea principal del consumo de prebióticos es promover el crecimiento de la proporción de microorganismos benéficos dentro de la microbiota intestinal; es decir, no se trata solamente del consumo de probióticos sino del consumo de componentes alimentarios que favorezcan el crecimiento natural de los probióticos (Addou et al., 2015). Estos autores alimentaron ratas Wistar durante 14 días con solución salina como control y con solución de oligoglúcidos. Al observar las poblaciones bacterianas de las heces se apreció un crecimiento de bacterias ácido-lácticas y bifidobacterias (productores de ácidos grasos de cadena corta) en el intestino de las ratas Wistar. Lo anterior permite concluir que los prebióticos (en este caso oligoglúcidos), estimulan la proliferación selectiva de microorganismos benéficos para la fisiología del hospedero (anfitrión) (Addou et al., 2015).

En otro estudio, Di Primio et al. (2021) evaluaron oligoglúcidos de galactosa y fructosa. Este estudio indicó que las ratas Wistar que consumieron durante una semana la mezcla de ambos oligoglúcidos, mostraron un aumento significativo de *Lactobacillus* en comparación con las ratas que no los consumieron. El consumo de estos prebióticos generó un efecto inmunomodulador similar al del consumo de probióticos. Asimismo, se observó un efecto

secundario y benéfico del consumo de esta mezcla de oligoglúcidos. Este efecto secundario fue que las ratas que consumieron los prebióticos tuvieron una mayor fijación de calcio, fósforo y magnesio en su fémur sin tener suplementación de estos minerales. Es decir, el consumo de prebióticos provocó una mayor absorción de los minerales a partir de la misma dieta. Este efecto se ha explicado por el descenso del pH intestinal debido a la bioconversión de oligoglúcidos (generando ácidos grasos de cadena corta), ionizando los minerales y solubilizándolos. Al estar solubles los minerales se vuelven más biodisponibles generando un doble beneficio del consumo de esta mezcla de oligoglúcidos (Di Primio et al., 2021).

El consumo en conjunto de probióticos y prebióticos también presenta un efecto inmunomodulador, como en el caso de la combinación de *Lactobacillus rhamnosus* con glicomacropéptidos, péptido bioactivo lácteo derivado de la hidrólisis de la k-caseína por acción de la quimosina o pepsina, a la cual se le han atribuido efectos antiinflamatorios, prebióticos e inmunomoduladores tras su consumo. El glicomacropéptido estimula selectivamente el crecimiento de microorganismos benéficos, además de su comprobada actividad antibacteriana contra microorganismos no deseados en el intestino, como *E. coli* enteropatógena y *Salmonella typhimurium* (Reyes-Pavón, 2020). Esta molécula limita la adherencia de las bacterias patógenas a la mucosa intestinal animal y con esto disminuye su crecimiento en el intestino. En este estudio se indujo alergia intestinal empleando alérgenos para sensibilizar a ratas Wistar. Las ratas mostraron síntomas como inflamación intestinal y modificaciones histopatológicas en el intestino. Después de inducir la alergia se les suministró un glicomacropéptido. La administración de esta molécula logró atenuar la respuesta alérgica mediada por inmunoglobulinas IgE. Además, se logró disminuir la inflamación intestinal y las alteraciones histopatológicas. Esto es evidencia de una disminución de células proinflamatorias

y citocinas características de una reacción alérgica intestinal. Por su parte, el consumo de glicomacropéptido en conjunto con *Lactobacillus rhamnosus*, no mostró efectos significativamente diferentes a los observados en el consumo individual del prebiótico. Por ello se consideraron, de acuerdo con los resultados, que es más eficiente tratar la alergia intestinal únicamente con glicomacropéptidos (Reyes-Pavón, 2020).

Todo lo anterior puede sintetizarse como sigue:

- Uso de la medicina preventiva para reducir la tasa de mortalidad y extender la esperanza de vida (Guilleminault et al., 2017)
- Mayor eficiencia de recursos (Arredondo, 2014)
- Importancia del papel terapéutico de suplementos dietéticos y sus efectos en la salud mediados por la microbiota intestinal buena o eubiosis (Nagpal et al., 2014)
- Detección de microorganismos específicos asociados con enfermedades o afecciones (Paule et al., 2018; Oseni et al., 2023)
- Aumento acelerado de enfermedades crónicas (aumento de costos) (Arredondo, 2014)
- Uso de matrices alimentarias específicas o bacteriófagos (Paule et al., 2018), así como el uso de estrategias distintas para combatir los cánceres, como el de próstata (Oseni et al., 2023)

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

Con base en el objetivo general de la investigación el cual fue el de “Estudiar en un modelo animal las repercusiones en la microbiota intestinal y la maduración del sistema inmunológico debido al tipo de dieta suministrada” es posible mencionar las siguientes conclusiones:

- La estrecha relación entre la microbiota intestinal, la dieta y el sistema inmunológico representa uno de los caminos de investigación más importantes de la actualidad en términos de salud
- La dieta repercute en el completo desarrollo del tracto gastrointestinal desde el momento de nacer
- La alimentación repercute en el completo desarrollo y correcto funcionamiento del sistema inmunológico
- Los aditivos alimentarios como los edulcorantes y los conservadores repercuten negativamente sobre la microbiota intestinal
- Los estímulos externos del medio sobre el tracto gastrointestinal y los individuos ayudan al correcto entrenamiento, modulación, funcionamiento y desarrollo del sistema inmunológico
- El completo desarrollo del tracto gastrointestinal incluye una correcta colonización de microorganismos que formen la microbiota intestinal
- El mal desarrollo de los espécimenes puede deberse a una deficiencia en su sistema inmune provocado por diversas afectaciones en la microbiota intestinal (o la de su madre) desde su nacimiento

- Los aditivos alimentarios, así como diversos alimentos deben ser estudiados con una mayor profundidad y a lo largo del tiempo en cuanto a las repercusiones en la microbiota intestinal y en la fisiología de los individuos como parte de sus regulaciones
- La disbiosis intestinal puede promover desregulaciones en el sistema inmune provocando inflamaciones sistémicas, enfermedades autoinmunes o mal funcionamiento inmunitario
- La inmunoregulación mediante probióticos, prebióticos y alimentos especializados es de suma importancia para un sano funcionamiento del sistema inmune aún en individuos sanos
- Existe una gran cantidad de enfermedades estrechamente relacionadas con la microbiota intestinal, por lo cual han surgido muchas investigaciones sobre ella y el cómo modificarla
- En el futuro la medicina preventiva deberá considerar a las relaciones entre la microbiota intestinal y el resto de los sistemas del hospedero.
- Promover el bienestar general de la madre en el periodo previo al gestacional y durante el mismo para evitar repercusiones en el organismo del producto
- No promover el uso indiscriminado de antibióticos durante el embarazo
- Promover el nacimiento por parto natural, en aquellos casos que sea posible, con el fin de que el recién nacido tenga una correcta inoculación con microorganismos benéficos.
- Promover una higiene en los recién nacidos sin excesos para evitar el problema de los organismos libres de microbiota
- Promover el consumo de probióticos como *Lactobacillus* o *Bifidobacterium* con la finalidad de modular el sistema inmunológico y reduciendo el riesgo de inflamaciones intestinales y sistémicas
- Promover el consumo de prebióticos beneficiando la eubiosis de la microbiota intestinal
- Evitar el exceso del consumo de aditivos alimentarios que estén relacionados con algunas disrupciones de la microbiota intestinal. Existen algunos que promueven cambios positivos en la microbiota intestinal; sin embargo, se requieren más estudios para saber cuáles podrían recomendarse para su consumo

Recomendaciones

Derivado de las evidencias encontradas en la literatura se pueden ofrecer las siguientes recomendaciones para tener un adecuado sistema inmune:

- Promover la lactancia materna durante los primeros meses de vida con el fin de incentivar un adecuado desarrollo gastrointestinal y un cuidado inmunitario mientras transcurre el tiempo de desarrollo propio de la nueva persona
- Evitar desbalances en las dietas que promuevan la disbiosis de la microbiota intestinal
- Promover el consumo medido de soya o genisteína durante la juventud con el fin de disminuir las probabilidades de cáncer en próstata en varones adultos mayores

- Indagar sobre los efectos en la microbiota intestinal de otros aditivos alimentarios que no fueron evaluados en la presente búsqueda bibliográfica como agentes espesantes, reguladores del pH, potenciadores del sabor, antiaglutinantes, antioxidantes, otros colorantes, etc.
- Considerar el estudio de los aditivos alimentarios en sus diferentes presentaciones y retirar del mercado las que resulten negativas para la salud
- Indagar el efecto sinérgico de diversos aditivos alimentarios en matrices alimentarias o bebidas no alcohólicas y retirarlos del mercado si resultan negativos para la salud
- Indagar los efectos de diferentes sustancias químicas sobre la microbiota intestinal materna y sus repercusiones sobre la fisiología del producto al consumir aditivos durante el embarazo
- La relación entre la microbiota intestinal, la dieta, el sistema inmune y diversas enfermedades es vital para investigaciones futuras. Estas relaciones representan deseablemente los pasos iniciales de esa futura medicina preventiva que resolverá la problemática actual (Oseni et al., 2024)

Glosario de términos y siglas para las Figuras 4a,b y 5 (Oseni et al., 2023 y algunos artículos citados)

Siglas y términos	Significado
Apoptosis y antiapoptosis	"La apoptosis, muerte o suicidio celular programado, es un mecanismo esencial en la homeostasis celular, y así en la regulación fisiológica del organismo. La muerte celular en ciertas enfermedades degenerativas del sistema nervioso central (SNC) está relacionada con la instauración de un proceso irreversible y espontáneo de apoptosis celular progresiva" (Harguindey, 2004)
CPA	Ácido ciclopiazónico (para control de la presión arterial a través de los canales de Ca ²⁺ , Gutiérrez et al., 2019)
CaP o PCa	Acrónimo para cáncer de próstata en español e inglés. Neoplasia maligna altamente heterogénea y de rápido progreso con una etiología compleja (Oseni et al., 2023)
CSC	Células madre cancerosas por sus siglas en inglés (cancer stem cells). Su presencia en los tumores de próstata, PCSC por sus siglas en inglés (prostate cancer stem cells), contribuye a la resistencia al tratamiento, las recaídas y la metástasis o parece ser que también puede contrarrestar estos daños
DAMPs	Patrones moleculares asociados con daños por sus siglas en inglés (Damage associated molecular patterns)
eNOS	Óxido nítrico sintasa endotelial por sus siglas en inglés (endotelial nitric oxide synthase (eNOS), también conocido como óxido nítrico sintasa 3 (NOS3), genera NO en los vasos sanguíneos y está involucrada con la regulación de la función vascular. Un NOS constitutivo dependiente de Ca ²⁺ proporciona una liberación basal de NO. Esta enzima cataliza esa reacción sin necesidad de gastar energía (ATP)
IRAK	Siglas en inglés para Interleukin-1 Receptor-Associated Kinase4 (Quinasa 4 asociada al receptor de Interleucina-1). Su ausencia implica deficiencias inmunitarias en los seres vivos y fenómenos inflamatorios
MAPK	Siglas en inglés para Mitogen activated protein kinase (Squires et al., 2003). Con IRAK refuerzan el sistema inmunológico de las células
NK Cells	Células asesinas naturales por sus siglas en inglés (natural killer cells)
PAMPs	Patrones moleculares asociados a patógenos por sus siglas en inglés (Pathogen associated molecular patterns) (Torres-Pérez, 2021)
PI3K	Siglas en inglés para la fosfatidilinositol 3-quinasa (phosphatidylinositol 3-Kinase) (Gutiérrez et al., 2019)
SR	Retículo sarcoplásmico por sus siglas en inglés (Gutiérrez et al., 2019)
TLR4	Siglas en inglés para Toll-like receptor activation (Velloso et al., 2015)
Treg	Células T regulatorias por su acrónimo en inglés (Pedroza-Pacheco et al., 2013)
VEGF	Siglas en inglés para 'Factor de crecimiento endotelial vascular' (Vascular endotelial growth factor, Oseni et al., 2023)
VEGFR	Siglas en inglés para el 'Receptor del factor de crecimiento endotelial vascular' (Vascular endotelial growth factor, Oseni et al., 2023)

Reconocimientos / Acknowledgments

Los autores y la autora agradecen al personal del sistema de bibliotecas de la institución a la que pertenecen por su valiosa asesoría a pesar de la pandemia. También agradecen la cuidadosa revisión y sus valiosas aportaciones que mejoraron notablemente este manuscrito por parte del Dr. Samuel Mendoza-Pérez. Este documento está basado de manera íntegra en la tesis profesional del primer autor (Negrete-Lira, 2022). Las personas interesadas pueden complementar la lectura de esta contribución en esa tesis / The authors thank the staff of the library system of the institution to which they belong for their valuable advice despite the pandemic. They also appreciate the careful review and valuable contributions that significantly improved this manuscript by Dr. Samuel Mendoza-Pérez. This document is based entirely on the professional thesis of the first author (Negrete-Lira, 2022). Interested people can complement the reading of this contribution in that thesis

Contribución de autoría / Authors' contributions

S.N.-L. realizó la búsqueda de literatura, hizo los análisis de cada contribución y escribió el primer borrador con la ayuda de R.S.G.-G. y M.d.C.D.-D.-d.-B. Los dos autores y la autora revisaron críticamente esta y las versiones anteriores del documento / S.N.-L. conducted the literature search, performed the analyzes, and wrote the first draft with the help of R.S.G.-G. and M.d.C.D.-D.-d.-B. All authors critically reviewed this and previous versions of the document

Financiación / Funding

Los autores expresan que no hubo financiamiento para realizar este manuscrito. Esta investigación bibliográfica utilizó los recursos digitales proporcionados por la Universidad Nacional Autónoma de México a su Dirección General de Bibliotecas (Biblioteca Digital, BiDiUNAM), especialmente la consulta de revistas internacionales indexadas, bancos de tesis de la UNAM y otras instituciones nacionales y extranjeras así como otros materiales disponibles en redes internacionales. Debido a la contingencia por Covid-19, la UNAM financió el aumento de la velocidad de internet para búsquedas bibliográficas / The authors express that there has been no funding to carry out this systematic review. This bibliographic research used the digital resources provided by the National Autonomous University of Mexico to its General Directorate of Libraries (Digital Library, BiDiUNAM), especially the consultation of international indexed journals, thesis banks of the UNAM, and other national and foreign institutions as well as other materials available in international networks. Due to the Covid-19 contingency, UNAM financed the increase in internet speed for bibliographic searches.

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 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 a la Revista Digital Internacional de Divulgación Científica del Instituto de Ciencias por dar a conocer las diversas temáticas que deben ser conocidas por los lectores.

Referencias

- Addou, S., Benaoumer, N., Bessalah, A., Mezemaze, F., Kheroua, O. 2015. Effet des prébiotiques sur la flore intestinale des rats Wistar. *Revue Française d'Allergologie*. 55(3): 238.
- Arredondo, A., 2014. Type 2 diabetes and health care costs in Latin America: Exploring the need for greater preventive medicine. *Bio-Medical Central Medicine*. 12(1): 1-6. <https://doi.org/10.1186/s12916-014-0136-z>
- Chandrasekar, T., Tang, J.C., Gao, A.C., Evans, C.P. 2015. Mechanisms of resistance in castration-resistant prostate cancer (CRPC). *Transl. Androl. Urol.* 4(3):365-380. doi: 10.3978/j.issn.2223-4683.2015.05.02
- Chen, G.Q., Chen, Y.Y., Wang, X.S., Wu, S.Z., Yang, H.M., Xu, H.Q., He, J.C., Wang, X.T., Chen, J.F., Zheng, R.Y. 2009. Chronic caffeine treatment attenuates experimental autoimmune encephalomyelitis induced by guinea pig spinal cord homogenates in Wistar rats. *Brain Research*. 1309: 116-125. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2009.10.054>
- Delgado-Venegas, C.S. 2018. Posible efecto modulador del probiótico *Lactococcus lactis* recombinante y silvestre sobre el daño hepático inducido por CCl4 en un modelo de rata Wistar. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de Aguascalientes, Centro de Ciencias Básicas. Aguascalientes, México. <http://bdigital.dgse.uaa.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/11317/1604/433950.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Di-Primo, A.N., Duca, G., Rubio, C. 2021. Actividad de los 'fructooligosacáridos' como prebiótico y efectos sobre el tracto intestinal. *BioTecnología*. 25(1):10-20.
- Ezendam, J., Baken, K., van Loveren, H. 2006. Immune effects of *Lactobacillus casei* Shirota. *RIVM Reports*. Pp. 1-52. Bilthoven, Países Bajos.
- Faustino-Rocha, A.I., Jota-Baptista, C., Nascimento-Gonçalves, E., Oliveira P.A. 2023. Evolution of models of prostate cancer: Their contribution to current therapies. *Anticancer Research*. 43(1): 323-333. DOI: <https://doi.org/10.21873/anticancer.16167>
- Ford, E.S. 2005. Risks for all-cause mortality, cardiovascular disease, and diabetes associated with the metabolic syndrome: A summary of the evidence. *Diabetes Care*. 28: 1769-1778. doi: 10.2337/diacare.28.7.1769
- Gual-Grau, A. 2019. Gut microbiota dysbiosis in diet-induced obesity. A focus on the influence of genetics, circadian rhythms, and potential prebiotics. Tesis Doctoral. Universitat Rovira i Virgili, Facultad de Química. Tarragona, España.
- Guillemínault, L., Oukel, H., Belleguic, C., Le Guen, Y., Germaud, P., Desfleurs, E., Leroyer, C., Magnan, A. 2017. Personalised medicine in asthma: From curative to preventive medicine. *European Respiratory Review*. 26(143): 1-14. <https://doi.org/10.1183/16000617.0010-2016>
- Gutiérrez, A., Contreras, C., Sánchez, A., Prieto, D. 2019. Role of phosphatidylinositol 3-Kinase (PI3K), mitogen activated protein kinase (MAPK), and protein kinase C (PKC) in calcium signaling pathways linked to the 1 (alpha)-adrenoceptor in resistance arteries. *Front. Physiol.* Vol. 10. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00055>
- Hansen, C.H.F., Nielsen, D.S., Kverka, M., Zakostelska, Z., Klimesova, K., Hudcovic, T., Tlaskalová-Hogenová, H., Hansen, A.K. 2012. Patterns of early gut colonization shape future immune responses of the host. *PLoS ONE*. 7(3): e34043. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0034043>
- Harguindey, S. 2004. Apoptosis y antiapoptosis en cáncer, Alzheimer y procesos neurodegenerativos: ¿Una dialéctica de contrarios? Nuevo abanico de posibilidades terapéuticas y peligros potenciales. *Oncología (Barcelona)*. 27(10): 579-589.
- Hart, A.L., Lammers, K., Brigidi, P., Vitali, B., Rizzello, F., Gionchetti, P., Campieri, M., Kamm, M.A., Stagg, A.J. 2004. Modulation of human dendritic cell phenotype and function by probiotic bacteria. *Gut*. 53(11): 1602-1609. <https://doi.org/10.1136/gut.2003.037325>
- INEGI. 2022. Estadística de defunciones registradas de enero a junio de 2021 (preliminar). <https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2022/dr/dr2021.pdf>
- Kustrimovic, N., Bombelli, R., Baci, D., Mortara, L. 2023. Microbiome and prostate cancer: A novel target for prevention and treatment. *International Journal of Molecular Sciences*. 24(2): 1511. doi: 10.3390/ijms24021511

- Lollo, P.C.B., Cruz, A.G., Morato, P.N., Moura, C.S., Carvalho-Silva, L.B., Oliveira, C.A. Faria, J.A.F., Amaya-Farfan, J. 2012. Probiotic cheese attenuates exercise-induced immune suppression in Wistar rats. *Journal of Dairy Science*. 95(7): 3549-3558.
- López-Marín, L.M., Valdemar-Aguilar, C.M. 2020. Patrones moleculares asociados a patógenos: ¿Héroes o villanos en nanomedicina? / Molecular patterns associated with pathogens: Heroes or villains in nanomedicine? *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*. 11(20): 53-63. <https://doi.org/10.22201/ceich.24485691e.2018.20.62595>
- Marques, C., Meireles, M., Norberto, S., Leite, J., Freitas, J., Pestana, D., Faria, A., Calhau, C. 2015. High-fat diet-induced obesity Rat model: A comparison between Wistar and Sprague Dawley rat. *Adipocyte*. 5: 1-11. <https://doi.org/10.1080/21623945.2015.1061723>
- Marrack, P., Kappler, J., Kotzin, B.L. 2001. Autoimmune disease: Why and where it occurs. *Nature Medicine*. 7(8): 899-905. <https://doi.org/10.1038/90935>
- Mayo Clinic. 2024. ¿Qué son los probióticos y los prebióticos? Respuesta de Katherine Zeratsky, RD, LD. [RD significa en inglés Registered Dietitian (Dietista registrado) y LD o LDN es para Licensed Dietitian (Nutritionist) (Licenciado Dietista y Nutricionista), indicando que la persona tiene licencia legal para ejercer en su estado los estudios que realizó] <https://www.mayoclinic.org/es/healthy-lifestyle/nutrition-and-healthy-eating/expert-answers/probiotics/faq-20058065#:~:text=Los%20probi%C3%B3ticos%20son%20alimentos%20o,nutrientes%20para%20la%20microbiota%20humana.>
- McLean, M.H., Dieguez, D., Miller, L.M., Young, H.A. 2015. Does the microbiota play a role in the pathogenesis of autoimmune diseases. *Gut*. 64(2): 332-341. <http://dx.doi.org/10.1136/gutjnl-2014-308514> Messora, M.R., Oliveira, L.F.F., Foureaux, R.C., Taba Jr, M., Zangerônimo, M.G., Furlaneto, F.A.C., Pereira, L.J. 2013. Probiotic therapy reduces periodontal tissue destruction and improves the intestinal morphology in rats with ligature induced periodontitis. *Journal of Periodontology*. 84(12): 1818-1826. <https://doi.org/10.1902/jop.2013.120644>
- Nagpal, R., Yadav, H., Marotta, F. 2014. Gut microbiota: The next-gen frontier in preventive and therapeutic medicine? *Frontiers in Medicine*. 1: 1-15. <https://doi.org/10.3389/fmed.2014.00015>
- Negrete-Lira, S. 2022. Repercusiones de la microbiota intestinal y la dieta en el desarrollo y maduración del sistema inmunológico en ratas hembra y macho de la estirpe Wistar". Tesis profesional (Química de Alimentos). Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM. Facultad de Química. Ciudad de México, México. 132.248.9.195/ptd2022/noviembre/0833114/Index.html
- Neu, J., Reverte, C.M., Mackey, A.D., Liboni, K., Tuhaček-Tenace, L.M., Hatch, M., Li, N., Caicedo, R.A., Schatz, D.A., Atkinson, M. 2005. Changes in intestinal morphology and permeability in the biobreeding rat before the onset of type 1 diabetes. *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition*. 40(5): 589-595. <https://doi.org/10.1097/01.mpg.0000159636.19346.c1>
- Neyrinck, A., Possemiers, S., Verstraete, W., De Backer, F., Cani, P., Delzenne, N. 2012. Dietary modulation of clostridial cluster XIVa gut bacteria (Roseburia spp.) by chitin-glucan fiber improves host metabolic alterations induced by high-fat diet in mice. *Journal of Nutritional Biochemistry*. 23: 51-59. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2010.10.008>
- Noor, N.A., Fahmy, H.M., Mohammed, F.F., Elsayed, A.A., Radwan, N.M. 2015. *Nigella sativa* ameliorates inflammation and demyelination in the experimental autoimmune encephalomyelitis-induced Wistar rats. *International Journal of Clinical and Experimental Pathology*. 8(6): 6269-6286.
- OMS. 2020. Las 10 principales causas de defunción. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death>. [Fecha de consulta 03/09/2022].
- Oseni, S.O., Naar, C., Pavlović, M., Asghar, W., Hartmann, J.X., Fields, G.B., Esiofu, N., Kumi-Diaka, J. 2023. The molecular basis and clinical consequences of chronic inflammation in prostatic diseases: Prostatitis, benign prostatic hyperplasia, and prostate cancer. *Cancers*. 15(12): 3110. <https://doi.org/10.3390/cancers15123110>
- Paule, A., Frezza, D., Edeas, M. 2018. Microbiota and phage therapy: Future challenges in medicine. *Medical Sciences*. 6(4): 86. <https://doi.org/10.3390/medsci6040086>
- Pedroza-Pacheco, I., Madrigal, A., Saudemont, A. 2013. Interaction between natural killer cells and regulatory T cells: Perspectives for immunotherapy. *Cellular & Molecular Immunology*. 10(3):222-229. doi:10.1038/cmi.2013.2

- Rasool, R., Ullah, I., Shahid, S., Mubeen, B., Imam, S.S., Alshehri, S., Ghoneim M.M., Alzarea, S.I., Murtaza, B.N., Nadeem, M.S., Kazmi, I. 2022. In vivo assessment of the ameliorative impact of some medicinal plant extracts on lipopolysaccharide-induced multiple sclerosis in Wistar rats. *Molecules*. 27(5): 1608. <https://doi.org/10.3390/molecules27051608>
- Reyes-Pavón, D. 2020. Efecto del glicomacropéptido, solo o combinado con *Lactobacillus rhamnosus*, sobre las alergias alimenticias en un modelo experimental. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Aguascalientes, Centro de Ciencias Básicas. Aguascalientes, México.
- Ruiz-Iglesias, P., Estruel-Amades, S., Camps-Bossacoma, M., Massot-Cladera, M., Castell, M., Pérez-Cano, F. J. 2020. Alterations in the mucosal immune system by a chronic exhausting exercise in Wistar rats. *Scientific Reports*. 10(1): 1-14. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74837-9>
- Scrimini, S., Pons, J., Sauleda, J. 2015. Células mieloides supresoras: Potencial vínculo entre la enfermedad pulmonar obstructiva crónica y el cáncer de pulmón / Myeloid-derived suppressor cells: Possible link between chronic obstructive pulmonary disease and lung cancer. *Archivos de Bronconeumología*. 52(1): 29-35. DOI: 10.1016/j.arbres.2015.07.003
- Squires, M.S., Hudson, E.A., Howells, L., Sale, S., Houghton, C.E., Jones, J.L., Fox, L.H., Dickens, M., Prigent, S.A., Manson, M.M. 2003. Relevance of mitogen activated protein kinase (MAPK) and phosphatidylinositol-3-kinase/protein kinase B (PI3K/PKB) pathways to induction of apoptosis by curcumin in breast cells. *Biochemical Pharmacology*. 65(3): 361-376. [https://doi.org/10.1016/S0006-2952\(02\)01517-4](https://doi.org/10.1016/S0006-2952(02)01517-4)
- Tlaskalová-Hogenová, H., Štěpánková, R., Kozáková, H., Hudcovic, T., Vannucci, L., Tučková, L., Rossmann, P., Hrnčíf, T., Kverka, M., Žakostelská, Z., Klimešová, K., Přibyllová, J., Bártová, J., Sanchez, D., Fundová, P., Borovská, D., Šrůtková, D., Zidek, Z., Schwarzer, M., Drastich, P., Funda, D. P. 2011. The role of gut microbiota (commensal bacteria) and the mucosal barrier in the pathogenesis of inflammatory and autoimmune diseases and cancer: contribution of germ-free and gnotobiotic animal models of human diseases. *Cellular & Molecular Immunology*. 8(2): 110-120. <https://doi.org/10.1038/cmi.2010.67>
- Torres-Pérez, A.A. 2021. Identificación proteómica de patrones moleculares asociados a daño durante la progresión clínica de la periodontitis. Tesis de Magister en Ciencias Odontológicas mención Periodontología. Universidad de Chile, Facultad de Odontología. Santiago, Chile.
- Velloso, L.A., Folli, F., Saad, M.J. 2015. TLR4 en la encrucijada de los nutrientes, la microbiota intestinal y la inflamación metabólica. *Endocrine Reviews*. 36: 245271.
- Wang, F. 2018. The roles of preventive and curative health care in economic development. *Public Library of Science ONE*. 13(11): 1-12. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0206808>
- WHO. 2022. Cancer. Available at: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cancer> [Last accessed on November 13, 2022]
- Yamada, Y., Beltrán, H. 2021. Características clínicas y biológicas del cáncer neuroendocrino de próstata. *Curr. Oncol. Rep.* 23(2):15. doi:10.1007/s1912-020-01003-9
- Yamamoto-Furusho, J.K., Sánchez-Morales, G.E., García-Rangel, D., Vargas-Alarcón, G. 2016. Polimorfismos genéticos de interleucina-22 en pacientes con colitis ulcerosa / Genetic polymorphisms of interleukin-22 in patients with ulcerative colitis. *Revista de Gastroenterología de México*. 81(2): 86-90. <https://doi.org/10.1016/j.rgmx.2016.02.002>
- Citas del texto descrito en este documento basado en Oseni, S.O., Naar, C., Pavlović, M., Asghar, W., Hartmann, J.X., Fields, G.B., Esiobu, N., Kumi-Diaka, J. 2023. The molecular basis and clinical consequences of chronic inflammation in prostatic diseases: Prostatitis, benign prostatic hyperplasia, and prostate cancer. *Cancers*. 15(12): 3110. <https://doi.org/10.3390/cancers15123110>:**
- [60] Shrestha, E.; White, J.R.; Yu, S.H.; Kulac, I.; Ertunc, O.; De Marzo, A.M.; Yegnasubramanian, S.; Mangold, L.A.; Partin, A.W.; Sfanos, K.S. Profiling the Urinary Microbiome in Men with Positive versus Negative Biopsies for Prostate Cancer. *J. Urol.* 2018, 199, 161–171.
- [72] Cui, L.; Morris, A.; Ghedin, E. The Human Mycobiome in Health and Disease. *Genome Med.* 2013, 5, 63.
- [77] Eloe-Fadrosh, E.A.; Rasko, D.A. The Human Microbiome: From Symbiosis to Pathogenesis. *Annu. Rev. Med.* 2013, 64, 145-163.
- [78] Harmon, K. Bugs Inside: What Happens When the Microbes That Keep Us Healthy Disappear? *Scientific American*, 16 December 2009.
- [79] Human Microbiome Project Consortium. A Framework for Human Microbiome Research. *Nature* 2012, 486, 215–221.

- [80] Kidane, D.; Chae, W.J.; Czochor, J.; Eckert, K.A.; Glazer, P.M.; Bothwell, A.L.M.; Sweasy, J.B. Interplay between DNA Repair and Inflammation, and the Link to Cancer. *Crit. Rev. Biochem. Mol. Biol.* 2014, 49, 116-139.
- [81] Massari, F.; Mollica, V.; Di Nunno, V.; Gatto, L.; Santoni, M.; Scarpelli, M.; Cimadamore, A.; Lopez-Beltran, A.; Cheng, L.; Battelli, N.; Montironi, R.; Brandi, G. The human microbiota and prostate cancer: Friend or foe? *Cancers* 2019, 11, 459.
- [82] Francescone, R.; Hou, V.; Grivennikov, S.I. Microbiome, inflammation, and cancer. *Cancer J.* 2014, 20, 181.
- [83] Feng, X.; Han, L.; Ma, S.; Zhao, L.; Wang, L.; Zhang, K.; Yin, P.; Guo, L.; Jing, W.; Li, Q. Microbes in tumoral in situ tissues and in tumorigenesis. *Front. Cell. Infect. Microbiol.* 2020, 10, 572570.
- [84] Markowski, M.C.; Boorjian, S.A.; Burton, J.P.; Hahn, N.M.; Ingersoll, M.A.; Vareki, S.M.; Pal, S.K.; Sfanos, K.S. The microbiome and genitourinary cancer: A collaborative review. *Eur. Urol.* 2019, 75, 637-646.
- [85] Zackular, J.P.; Baxter, N.T.; Iverson, K.D.; Sadler, W.D.; Petrosino, J.F.; Chen, G.Y.; Schloss, P.D. The gut microbiome modulates colon tumorigenesis. *mBio.* 2013, 4, e00692-13.
- [86] Katongole, P.; Sande, O.J.; Joloba, M.; Reynolds, S.J.; Niyonzima, N. The human microbiome and its link in prostate cancer risk and pathogenesis. *Infect. Agent Cancer* 2020, 15, 53.
- [87] Cavarretta, I.; Mancini, N.; Salonia, A. Analysis of the enteric microbiome: First tentative steps towards a comprehensive work-up of prostate cancer? *Eur. Urol.* 2018, 74, 583-584.
- [88] Cavarretta, I.; Ferrarese, R.; Cazzaniga, W.; Saita, D.; Luciano, R.; Ceresola, E.R.; Locatelli, I.; Visconti, L.; Lavorgna, G.; Briganti, A.; Nebuloni, M.; Doglioni, C.; Clementi, M.; Montorsi, F.; Canduci, F.; Salonia, A. The microbiome of the prostate tumor microenvironment. *Eur. Urol.* 2017, 72, 625-631.
- [89] Miyake, M.; Ohnishi, K.; Hori, S.; Nakano, A.; Nakano, R.; Yano, H.; Ohnishi, S.; Owari, T.; Morizawa, Y.; Itami, Y.; Nakai, Y.; Inoue, T.; Anai, S.; Torimoto, K.; Tanaka, N.; Fujii, T.; Furuya, H.; Rosser, C.J.; Fujimoto, K. *Mycoplasma genitalium* infection and chronic inflammation in human prostate cancer: Detection using prostatectomy and needle biopsy specimens. *Cells.* 2019, 8, 212.
- [90] Liss, M.A.; White, J.R.; Goros, M.; Gelfond, J.; Leach, R.; Johnson-Pais, T.; Lai, Z.; Rourke, E.; Basler, J.; Ankerst, D.; Shah, D.P. Metabolic biosynthesis pathways identified from fecal microbiome associated with prostate cancer. *Eur. Urol.* 2018, 74, 575-582.
- [96] Xuan, C.; Shamonki, J.M.; Chung, A.; DiNome, M.L.; Chung, M.; Sieling, P.A.; Lee, D.J. Microbial dysbiosis is associated with human breast cancer. *PLoS ONE* 2014, 9, e83744.
- [97] Elkahwaji, J.E.; Hauke, R.J.; Brawner, C.M. Chronic bacterial inflammation induces prostatic intraepithelial neoplasia in mouse prostate. *Br. J. Cancer.* 2009, 101, 1740-1748.
- [98] Libertini, M.V.; Locasale, J.W. The Warburg effect: How does it benefit cancer cells? *Trends Biochem. Sci.* 2016, 41, 211-218.
- [99] Duncan, S.H.; Louis, P.; Flint, H.J. Cultivable bacterial diversity from the human colon. *Lett. Appl. Microbiol.* 2007, 44, 343-350.
- [100] Bullman, S.; Pedamallu, C.S.; Scincins, E.; Clancy, T.E.; Zhang, X.; Cai, D.; Neuberg, D.; Huang, K.; Guevara, F.; Nelson, T.; Chipashvili, O.; Hagan, T.; Walker, M.; Ramachandran, A.; Diosdado, B.; Serna, G.; Mulet, N.; Landolfi, S.; Ramón-y-Cajal, S.; Fasani, R.; Aguirre, A.J.; Ng, K.; Élez, E.; Ogino, S.; Taberero, J.; Fuchs, C.S.; Hahn, W.C.; Nuciforo, P.; Meyerson, M. Analysis of fusobacterium persistence and antibiotic response in colorectal cancer. *Science.* 2017, 358, 1443-1448.
- [252] Rybak, A.P.; He, L.; Kapoor, A.; Cutz, J.C.; Tang, D. Characterization of sphere-propagating cells with stem-like properties from DU145 prostate cancer cells. *Biochim. Biophys. Acta Mol. Cell Res.* 2011, 1813, 683-694.
- [256] Yun, E.-J.; Lo, U.-G.; Hsieh, J.-T. The evolving landscape of prostate cancer stem cell (PCSC): Therapeutic implications and future challenges. *Asian J. Urol.* 2016, 3, 203-210.
- [257] Menendez, J.A.; Alarcón, T. Metabstemness: A new cancer hallmark. *Front. Oncol.* 2014, 4, 262.
- [258] Shi, X.; Zhang, Y.; Zheng, J.; Pan, J. Reactive oxygen species in cancer stem cells. *Antioxid. Redox Signal.* 2012, 16, 1215-1228.

- [259] Oseni, S.O.; Kwasi Kumi-Diaka, J. emerging role of cancer stemness in prostate cancer recurrence and management. *Acta Sci. Cancer Biol.* 2018, 2, 2–5.
- [260] Chen, K.; Huang, Y.; Chen, J. Understanding and targeting cancer stem cells: Therapeutic implications and challenges. *Acta Pharmacol. Sin.* 2013, 34, 732–740.
- [261] Rowehl, R.A.; Crawford, H.; Dufour, A.; Ju, J.; Botchkina, G.I. Genomic analysis of prostate cancer stem cells isolated from a highly metastatic cell line. *Cancer Genom. Proteom.* 2008, 5, 301–310.
- Citas del artículo Faustino-Rocha, A.I., Jota-Baptista, C., Nascimento-Gonçalves, E., Oliveira P.A. 2023. Evolution of models of prostate cancer: Their contribution to current therapies. *Anticancer Research.* 43(1): 323-333. DOI: <https://doi.org/10.21873/anticancer.16167> donde se plantearon como pregunta de investigación qué modelos están disponibles para el estudio y la solución deseable del cáncer:**
- [22] WHO. 2022. Cancer. Available at: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cancer> [Last accessed on November 13, 2022]
- [23] Moore RA, Melchionna RH. 1937. Production of tumors of the prostate of the white rat with 1:2-benzopyrene. *Am J Cancer* 30: 731-741, 1937. Abstract/FREE Full TextGoogle Scholar
- [24] Dunning WF, Curtis MR and Segaloff A. 1946. Methylcholanthrene squamous cell carcinoma of the rat prostate with skeletal metastases, and failure of the rat liver to respond to the carcinogen. *Cancer Res* 6: 256-262, 1946. PMID: 21024837. FREE Full TextGoogle Scholar
- [25] Pour PM. 1981. A new prostatic cancer model: systemic induction of prostatic cancer in rats by a nitrosamine. *Cancer Lett* 13(4): 303-308, 1981. PMID: 6171336. DOI: 10.1016/0304-3835(81)90058-6. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [26] Bosland MC. 1996. Chemical and hormonal induction of prostate cancer in animal models. *Urol Oncol* 2(4): 103-110, 1996. PMID: 21224148. DOI: 10.1016/s1078-1439(97)82840-2. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [27] Katayama S, Fiala E, Reddy BS, Rivenson A, Silverman J, Williams GM and Weisburger JH. 1982. Prostate adenocarcinoma in rats: induction by 3,2-dimethyl-4-aminobiphenyl. *J Natl Cancer Inst* 68(5): 867-873, 1982. PMID: 6951094. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [28] Shirai T, Sano M, Tamano S, Takahashi S, Hirose M, Futakuchi M, Hasegawa R, Imaida K, Matsumoto K, Wakabayashi K, Sugimura T and Ito N. 1997. The prostate: a target for carcinogenicity of 2-amino-1-methyl-6-phenylimidazo[4,5-b]pyridine (PhIP) derived from cooked foods. *Cancer Res* 57(2): 195-198. PMID: 9000552. Abstract/FREE Full TextGoogle Scholar
- [29] Samy RP, Rajendran P, Li F, Anandi NM, Stiles BG, Ignacimuthu S, Sethi G and Chow VT. 2012. Identification of a novel Calotropis proceera protein that can suppress tumor growth in breast cancer through the suppression of NF-κB pathway. *PLoS One* 7(12): e48514. PMID: 23284617. DOI: 10.1371/journal.pone.0048514. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [30] Nascimento-Gonçalves E, Faustino-Rocha AI, Seixas F, Ginja M, Colaço B, Ferreira R, Fardilha M and Oliveira PA. 2018. Modelling human prostate cancer: Rat models. *Life Sci* 203: 210-224. PMID: 29684445. DOI: 10.1016/j.lfs.2018.04.014. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [31] Shirai T, Takahashi S, Cui L, Futakuchi M, Kato K, Tamano S and Imaida K. 2000. Experimental prostate carcinogenesis - rodent models. *Mutat Res* 462(2-3): 219-226. PMID: 10767633. DOI: 10.1016/s1383-5742(00)00039-9. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [32] Shappell SB, Thomas GV, Roberts RL, Herbert R, Ittmann MM, Rubin MA, Humphrey PA, Sundberg JP, Rozengurt N, Barrios R, Ward JM and Cardiff RD. 2004. Prostate pathology of genetically engineered mice: definitions and classification. The consensus report from the Bar Harbor meeting of the Mouse Models of Human Cancer Consortium Prostate Pathology Committee. *Cancer Res* 64(6): 2270-2305. PMID: 15026373. DOI: 10.1158/0008-5472.ca-n03-0946. Abstract/FREE Full TextGoogle Scholar
- [33] Bosland MC. 1992. Animal models for the study of prostate carcinogenesis. *J Cell Biochem Suppl* 16H: 89-98. PMID: 1289679. DOI: 10.1002/jcb.240501221. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [34] Nascimento-Gonçalves E, Seixas F, Ferreira R, Colaço B, Parada B and Oliveira PA. 2021. An overview of the latest in state-of-the-art murine models for prostate cancer. *Expert Opin Drug Discov* 16(11): 1349-1364. PMID: 34224283. DOI: 10.1080/17460441.2021.1943354. CrossRefPubMedGoogle Scholar

- [35] Nascimento-Gonçalves E, Ferreira R, Oliveira PA and Colaço BJA. 2020. An overview of current alternative models for use in the context of prostate cancer research. *Altern Lab Anim* 48(2): 58-69, PMID: 32614643. DOI: 10.1177/0261192920929701. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [36] Tennant TR, Kim H, Sokoloff M and Rinker-Schaeffer CW. 2000. The Dunning model. *Prostate* 43(4): 295-302, PMID: 10861749. DOI: 10.1002/1097-0045(20000601)43:4<295::aid-pros9>3.0.co;2-w. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [37] Pollard M. 1973. Spontaneous prostate adenocarcinomas in aged germfree Wistar rats. *J Natl Cancer Inst* 51(4): 1235-1241, PMID: 4745857. DOI: 10.1093/jnci/51.4.1235. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [38] Shain SA, McCullough B and Segaloff A. 1975. Spontaneous adenocarcinomas of the ventral prostate of aged A X C rats. *J Natl Cancer Inst* 55(1): 177-180, PMID: 1159811. DOI: 10.1093/jnci/55.1.177. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [39] Isaacs JT. 1984. The aging ACI/Seg versus Copenhagen male rat as a model system for the study of prostatic carcinogenesis. *Cancer Res* 44(12 Pt 1): 5785-5796, PMID: 6498839. Abstract/FREE Full TextGoogle Scholar
- [40] Bosland MC. 1996. Chemical and hormonal induction of prostate cancer in animal models. *Urol Oncol* 2(4): 103-110, PMID: 21224148. DOI: 10.1016/s1078-1439(97)82840-2. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [41] Rao KV, Johnson WD, Bosland MC, Lubet RA, Steele VE, Kelloff GJ and McCormick DL. 1999. Chemoprevention of rat prostate carcinogenesis by early and delayed administration of dehydroepiandrosterone. *Cancer Res* 59(13): 3084-3089, PMID: 10397249. Abstract/FREE Full TextGoogle Scholar
- [42] Bosland MC. 1996. Chemical and hormonal induction of prostate cancer in animal models. *Urol Oncol* 2(4): 103-110, PMID: 21224148. DOI: 10.1016/s1078-1439(97)82840-2. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [43] Shirai T, Tada M, Kojima M, Hasegawa R, Masui T and Ito N. 1994. DNA adducts in target and nontarget tissues of 3,2-dimethyl-4-aminobiphenyl in rats. *Environ Health Perspect* 102 Suppl 6(Suppl 6): 167-172, PMID: 7889841. DOI: 10.1289/ehp.94102s6167. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [44] Takayama K, Yamashita K, Wakabayashi K, Sugimura T and Nagao M. 1989. DNA modification by 2-amino-1-methyl-6-phenylimidazo[4,5-b]pyridine in rats. *Jpn J Cancer Res* 80(12): 1145-1148, PMID: 2516840. DOI: 10.1111/j.1349-7006.1989.tb01644.x. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [45] Snyderwine EG, Venugopal M and Yu M. 2002. Mammary gland carcinogenesis by food-derived heterocyclic amines and studies on the mechanisms of carcinogenesis of 2-amino-1-methyl-6-phenylimidazo[4,5-b]pyridine (PhIP). *Mutat Res* 506-507: 145-152, PMID: 12351154. DOI: 10.1016/s0027-5107(02)00161-6 CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [46] Tang MX, Ogawa K, Asamoto M, Chewonarin T, Suzuki S, Tanaka T and Shirai T. 2011. Effects of nobelitin on PhIP-induced prostate and colon carcinogenesis in F344 rats. *Nutr Cancer* 63(2): 227-233, PMID: 21298591. DOI: 10.1080/01635581.2011.523506. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [47] Naiki-Ito A, Chewonarin T, Tang M, Pitchakarn P, Kuno T, Ogawa K, Asamoto M, Shirai T and Takahashi S. 2015. Ellagic acid, a component of pomegranate fruit juice, suppresses androgen-dependent prostate carcinogenesis via induction of apoptosis. *Prostate* 75(2): 151-160, PMID: 25284475. DOI: 10.1002/pros.22900. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [48] Canene-Adams K, Sfanos KS, Liang CT, Yegnasubramanian S, Nelson WG, Brayton C and De Marzo AM. 2013. Dietary chemoprevention of PhIP induced carcinogenesis in male Fischer 344 rats with tomato and broccoli. *PLoS One* 8(11): e79842, PMID: 24312188. DOI: 10.1371/journal.pone.0079842. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [49] Lawson TA, Gingell R, Nagel D, Hines LA and Ross A. 1981. Methylation of hamster DNA by the carcinogen N-nitroso-bis (2-oxopropyl)amine. *Cancer Lett* 11(3): 251-255, PMID: 7248930. DOI: 10.1016/0304-3835(81)90116-6. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [50] Johannsen M, Thiesen B, Jordan A, Taymoorian K, Gneveckow U, Waldöfner N, Scholz R, Koch M, Lein M, Jung K and Loening SA. 2005. Magnetic fluid hyperthermia (MFH) reduces prostate cancer growth in the orthotopic Dunning R3327 rat model. *Prostate* 64(3): 283-292, PMID: 15726645. DOI: 10.1002/pros.20213. CrossRefPubMedGoogle Scholar

- [51] McCullough DJ, Stabley JN, Siemann DW and Behnke BJ. 2014. Modulation of blood flow, hypoxia, and vascular function in orthotopic prostate tumors during exercise. *J Natl Cancer Inst* 106(4): dju036, PMID: 24627275. DOI: 10.1093/jnci/dju036. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [52] McCullough DJ, Nguyen LM, Siemann DW and Behnke BJ. 1985. Effects of exercise training on tumor hypoxia and vascular function in the rodent preclinical orthotopic prostate cancer model. *J Appl Physiol* 115(12): 1846-1854, 2013. PMID: 24177690. DOI: 10.1152/jappphysiol.00949.2013. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [53] Neubauer BL, Bemis KG, Best KL, Goode RL, Merriman RL, Smith GF, Tanzer LR and Hoover DM. 1986. Metastatic spread of the P4111 prostatic adenocarcinoma after implantation in the tail of the rat. *Prostate* 8(3): 265-276, PMID: 3703746. DOI: 10.1002/pros.299008030. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [54] Johnson LE, Becker JT, Dubovsky JA, Olson BM and McNeel DG. 2012. Prostate carcinoma in transgenic Lewis rats - a tumor model for evaluation of immunological treatments. *Chin Clin Oncol* 2(1): doi:10.3978/j.issn.2304-3865.11.06, 2013. PMID: 24324949. DOI: 10.3978/j.issn.2304-3865.2012.11.06. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [55] Mottet N, van den Bergh RCN, Briers E, Van den Broeck T, Cumberbatch MG, De Santis M, Fanti S, Fossati N, Gandaglia G, Gillessen S, Grivas N, Grummet J, Henry AM, van der Kwast TH, Lam TB, Lardas M, Liew M, Mason MD, Moris L, Oprea-Lager DE, van der Poel HG, Rouvière O, Schoots IG, Tilki D, Wiegel T, Willemsse PM and Cornford P. 2021. EAU-EANM-ESTRO-ESUR-SIOG guidelines on prostate cancer-2020 update. Part 1: Screening, diagnosis, and local treatment with curative intent. *Eur Urol* 79(2): 243-262, PMID: 33172724. DOI: 10.1016/j.eururo.2020.09.042. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [56] Cornford P, van den Bergh RCN, Briers E, Van den Broeck T, Cumberbatch MG, De Santis M, Fanti S, Fossati N, Gandaglia G, Gillessen S, Grivas N, Grummet J, Henry AM, der Kwast THV, Lam TB, Lardas M, Liew M, Mason MD, Moris L, Oprea-Lager DE, der Poel HGV, Rouvière O, Schoots IG, Tilki D, Wiegel T, Willemsse PM and Mottet N. 2021. EAU-EANM-ESTRO-ESUR-SIOG guidelines on prostate cancer. Part II-2020 update: Treatment of relapsing and metastatic prostate cancer. *Eur Urol* 79(2): 263-282, PMID: 33039206. DOI: 10.1016/j.eururo.2020.09.046. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [57] Parker C, Castro E, Fizazi K, Heidenreich A, Ost P, Procopio G, Tombal B, Gillessen S and ESMO Guidelines Committee. 2020. : Prostate cancer: ESMO Clinical Practice Guidelines for diagnosis, treatment and follow-up. *Ann Oncol* 31(9): 1119-1134, PMID: 32593798. DOI: 10.1016/j.annonc.2020.06.011. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [58] Basiri A, de la Rosette JJ, Tabatabaei S, Woo HH, Laguna MP and Shemshaki H. 2018. Comparison of retroperic, laparoscopic and robotic radical prostatectomy: who is the winner? *World J Urol* 36(4): 609-621, PMID: 29362896. DOI: 10.1007/s00345-018-2174-1. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [59] Wang JW and Man LB. 2020. Transurethral resection of the prostate stricture management. *Asian J Androl* 22(2): 140-144, PMID: 31898584. DOI: 10.4103/aja.aja_126_19. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [60] Jaymand M, Davatgaran Taghipour Y, Rezaei A, Derakhshankhah H, Foad abazari M, Samadian H and Hamblin M. 2022. Radiolabeled carbon-based nanostructures: New radiopharmaceuticals for cancer therapy? *Coordination Chemistry Reviews* 440: 213974, DOI: 10.1016/j.ccr.2021.213974. CrossRefGoogle Scholar
- [61] FDA approves pluvicto for metastatic castration-resistant prostate cancer | FDA. Available at: <https://www.fda.gov/drugs/resources-information-approved-drugs/fda-approves-pluvicto-metastatic-castration-resistant-prostate-cancer> [Last accessed on November 13, 2022]. Google Scholar
- [62] Kratochwil C, Giesel FL, Stefanova M, Benešová M, Bronzel M, Afshar-Oromieh A, Mier W, Eder M, Kopka K and Haberkorn U. 2016. PSMA-targeted radionuclide therapy of metastatic castration-resistant prostate cancer with 177Lu-labeled PSMA-617. *J Nucl Med* 57(8): 1170-1176, PMID: 26985056. DOI: 10.2967/jnumed.115.171397. Abstract/FREE Full TextGoogle Scholar
- [63] Violet J, Jackson P, Ferdinandus J, Sandhu S, Akhurst T, Iravani A, Kong G, Kumar AR, Thang SP, Eu P, Scalzo M, Murphy D, Williams S, Hicks RJ and Hofman MS. 2019. Dosimetry of (177)Lu-PSMA-617 in metastatic castration-resistant prostate cancer: correlations between pretherapeutic imaging and whole-body tumor dosimetry with treatment outcomes. *J Nucl Med* 60(4): 517-523, PMID: 30291192. DOI: 10.2967/jnumed.118.219352. Abstract/FREE Full TextGoogle Scholar

- [64] Sartor O, de Bono J, Chi KN, Fizazi K, Herrmann K, Rahbar K, Tagawa ST, Nordquist LT, Vaishampayan N, El-Haddad G, Park CH, Beer TM, Armour A, Pérez-Contreras WJ, DeSilvio M, Kpamegan E, Gericke G, Messmann RA, Morris MJ, Krause BJ and VISION Investigators. 2021. Lutetium-177-PSMA-617 for metastatic castration-resistant prostate cancer. *N Engl J Med* 385(12):1091-1103, PMID: 34161051. DOI: 10.1056/NEJMoa2107322. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [65] Smith MR, Saad F, Chowdhury S, Oudard S, Hadaschik BA, Graff JN, Olmos D, Mainwaring PN, Lee JY, Uemura H, Lopez-Gitlitz A, Trudel GC, Espina BM, Shu Y, Park YC, Rackoff WR, Yu MK, Small EJ and SPARTAN Investigators. 2018. Apalutamide treatment and metastasis-free survival in prostate cancer. *N Engl J Med* 378(15):1408-1418, PMID: 29420164. DOI: 10.1056/NEJMoa1715546. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [66] FDA. Novel Drug Approvals for 2018. Available at: <https://www.fda.gov/drugs/new-drugs-fda-cders-new-molecular-entities-and-new-therapeutic-biological-products/novel-drug-approvals-2018> [Last accessed on November 13, 2022]. Google Scholar
- [67] Erleada | European Medicines Agency. Available at: <https://www.ema.europa.eu/en/medicines/human/EPAR/erleada> [Last accessed on November 13, 2022]. Google Scholar
- [68] Nubeqa | European Medicines Agency. Available at: <https://www.ema.europa.eu/en/medicines/human/EPAR/nubeqa> [Last accessed on November 13, 2022]. Google Scholar
- [69] FDA approves darolutamide for non-metastatic castration-resistant prostate cancer | FDA. Available at: <https://www.fda.gov/drugs/resources-information-approved-drugs/fda-approves-darolutamide-non-metastatic-castration-resistant-prostate-cancer> [Last accessed on November 13, 2022]. Google Scholar
- [70] Smith MR, Hussain M, Saad F, Fizazi K, Sternberg CN, Crawford ED, Kopyltsov E, Park CH, Alekseev B, Montesa-Pino Á, Ye D, Parnis F, Cruz F, Tammela TLJ, Suzuki H, Utraiainen T, Fu C, Uemura M, Méndez-Vidal MJ, Maughan BL, Joensuu H, Thiele S, Li R, Kuss I, Tombal B and ARASENS Trial Investigators. 2022. Darolutamide and survival in metastatic, hormone-sensitive prostate cancer. *N Engl J Med* 386(12):1132-1142, PMID: 35179323. DOI: 10.1056/NEJMoa2119115. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [71] Fizazi K, Shore N, Tammela TL, Ulys A, Vjaters E, Polyakov S, Jievaltas M, Luz M, Alekseev B, Kuss I, Le Berre MA, Petrenciuc O, Snapir A, Saraphojia T, Smith MR and ARAMIS Investigators. 2020. Nonmetastatic, castration-resistant prostate cancer and survival with darolutamide. *N Engl J Med* 383(11): 1040-1049, PMID: 32905676. DOI: 10.1056/NEJMoa2001342. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [72] Valerio M, Dickinson L, Ali A, Ramachandran N, Donaldson I, Freeman A, Ahmed HU and Emberton M. 2014. A prospective development study investigating focal irreversible electroporation in men with localised prostate cancer: Nanoknife Electroporation Ablation Trial (NEAT). *Contemp Clin Trials* 39(1): 57-65, PMID: 25072507. DOI: 10.1016/j.cct.2014.07.006. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [73] Al-Sakere B, André F, Bernat C, Connault E, Opolon P, Davalos RV, Rubinsky B and Mir LM. 2007. Tumor ablation with irreversible electroporation. *PLoS One* 2(11): e1135, 2007. PMID: 17989772. DOI: 10.1371/journal.pone.0001135. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [74] Ong S, Leonardo M, Chengodu T, Bagguley D and Lawrentschuk N. 2021. Irreversible electroporation for prostate cancer. *Life (Basel)* 11(6): 490, PMID: 34071934. DOI: 10.3390/life11060490. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [75] Rubinsky B, Onik G and Mikus P. 2007. Irreversible electroporation: a new ablation modality – clinical implications. *Technol Cancer Res Treat* 6(1): 37-48, PMID: 17241099. DOI: 10.1177/1533303460700600106. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [76] Valerio M, Stricker PD, Ahmed HU, Dickinson L, Ponsky L, Shnier R, Allen C and Emberton M. 2014. Initial assessment of safety and clinical feasibility of irreversible electroporation in the focal treatment of prostate cancer. *Prostate Cancer Prostatic Dis* 17(4): 343-347, PMID: 25179590. DOI: 10.1038/pcan.2014.33. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [77] Guenther E, Klein N, Zapf S, Weil S, Schlosser C, Rubinsky B and Stehling MK. 2019. Prostate cancer treatment with Irreversible Electroporation (IRE): Safety, efficacy and clinical experience in 471 treatments. *PLoS One* 14(4): e0215093, PMID: 30986263. DOI: 10.1371/journal.pone.0215093. CrossRefPubMedGoogle Scholar

- [78] Colletтини F, Enders J, Stephan C, Fischer T, Baur AD, Penzkofer T, Busch J, Hamm B and Gebauer B. 2019. Image-guided irreversible electroporation of localized prostate cancer: Functional and oncologic outcomes. *Radiology* 292(1): 250-257, PMID: 31161973. DOI: 10.1148/radiol.2019181987. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [79] Dong S, Wang H, Zhao Y, Sun Y and Yao C. 2018. First human trial of high-frequency irreversible electroporation therapy for prostate cancer. *Technol Cancer Res Treat* 17: 1533033818789692, PMID: 30045668. DOI: 10.1177/1533033818789692. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [80] Kantoff PW, Higano CS, Shore ND, Berger ER, Small EJ, Penson DF, Redfern CH, Ferrari AC, Dreicer R, Sims RB, Xu Y, Frohlich MW, Schellhammer PF and IMPACT Study Investigators. 2010. Sipuleucel-T immunotherapy for castration-resistant prostate cancer. *N Engl J Med* 363(5): 411-422, PMID: 20818862. DOI: 10.1056/NEJMoa1001294. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [81] Kim TJ and Koo KC. 2020. Current status and future perspectives of checkpoint inhibitor immunotherapy for prostate cancer: a comprehensive review. *Int J Mol Sci* 21(15): 5484, PMID: 32751945. DOI: 10.3390/ijms21155484. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [82] Provenge | European Medicines Agency. Available at: <https://www.ema.europa.eu/en/medicines/human/EPAR/provenge> [Last accessed on November 13, 2022]. Google Scholar
- [83] Cornford P, Bellmunt J, Bolla M, Briers E, De Santis M, Gross T, Henry AM, Joniau S, Lam TB, Mason MD, van der Poel HG, van der Kwast TH, Rouvière O, Wiegler T and Mottet N. 2017. EAU-ESTRO-SIOG guidelines on prostate cancer. Part II: Treatment of relapsing, metastatic, and castration-resistant prostate cancer. *Eur Urol* 71(4): 630-642, PMID: 27591931. DOI: 10.1016/j.eururo.2016.08.002. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [84] Gulley JL, Borre M, Vogelzang NJ, Ng S, Agarwal N, Parker CC, Pook DW, Rathenborg P, Flaig TW, Carles J, Saad F, Shore ND, Chen L, Heery CR, Gerritsen WR, Priou F, Langkilde NC, Novikov A and Kantoff PW. 2019. Phase III trial of PROSTVAC in asymptomatic or minimally symptomatic metastatic castration-resistant prostate cancer. *J Clin Oncol* 37(13): 1051-1061, PMID: 30817251. DOI: 10.1200/JCO.18.02031. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [85] Janiczek M, Szyłberg Ł, Kasperska A, Kowalewski A, Parol M, Antosik P, Radecka B and Marszałek A. 2017. Immunotherapy as a promising treatment for prostate cancer: a systematic review. *J Immunol Res* 4861570, 2017. PMID: 29109964. DOI: 10.1155/2017/4861570. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [86] Abida W, Cheng ML, Armenia J, Middha S, Autio KA, Vargas HA, Rathkopf D, Morris MJ, Danila DC, Slovin SF, Carbone E, Barnett ES, Hullings M, Hechtman JF, Zehir A, Shia J, Jonsson P, Stadler ZK, Srinivasan P, Laudone VP, Reuter V, Wolchok JD, Socci ND, Taylor BS, Berger MF, Kantoff PW, Sawyers CL, Schultz N, Solit DB, Gopalan A and Scher HI. 2019. Analysis of the prevalence of microsatellite instability in prostate cancer and response to immune checkpoint blockade. *JAMA Oncol* 5(4): 471-478, PMID: 30589920. DOI: 10.1001/jamaoncol.2018.5801. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [87] Petrylak DP, Ratta R, Gafanov R, Facchini G, Piulats JM, Kramer G, Flaig TW, Chandana SR, Li B, Burgents J and Fizazi K. 2021. KEYNOTE-921: Phase III study of pembrolizumab plus docetaxel for metastatic castration-resistant prostate cancer. *Future Oncol* 17(25): 3291-3299, PMID: 34098744. DOI: 10.2217/fo-2020-1133. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [88] Gao J, Ward JF, Pettaway CA, Shi LZ, Subudhi SK, Vence LM, Zhao H, Chen J, Chen H, Efstathiou E, Troncso P, Allison JP, Logothetis CJ, Wistuba II, Sepulveda MA, Sun J, Wargo J, Blando J and Sharma P. 2017. VISTA is an inhibitory immune checkpoint that is increased after ipilimumab therapy in patients with prostate cancer. *Nat Med* 23(5): 551-555, PMID: 28346412. DOI: 10.1038/nm.4308. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [89] Kwon ED, Drake CG, Scher HI, Fizazi K, Bossi A, van den Eertwegh AJ, Krainer M, Houede N, Santos R, Mahammed H, Ng S, Maio M, Franke FA, Sundar S, Agarwal N, Bergman AM, Ciuleanu TE, Korbenfeld E, Sengeløv L, Hansen S, Logothetis C, Beer TM, McHenry MB, Gagnier P, Liu D, Gerritsen WR and CA184-043 Investigators. 2014. Ipilimumab versus placebo after radiotherapy in patients with metastatic castration-resistant prostate cancer that had progressed after docetaxel chemotherapy (CA184-043): a multicentre, randomised, double-blind, phase 3 trial. *Lancet Oncol* 15(7): 700-712, PMID: 24831977. DOI: 10.1016/S1470-2045(14)70189-5. CrossRefPubMedGoogle Scholar

- [90] Taghizadeh H, Marhold M, Tomasich E, Udovica S, Merchant A and Krainer M. 2019. Immune checkpoint inhibitors in mCRPC - rationales, challenges and perspectives. *Oncoimmunology* 8(11): e1644109, PMID: 31646092. DOI: 10.1080/2162402X.2019.1644109. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [91] Marhold M, Kramer G, Krainer M and Le Magnen C. 2022. The prostate cancer landscape in Europe: Current challenges, future opportunities. *Cancer Lett* 526: 304-310, PMID: 34863887. DOI:10.1016/j.canlet.2021.11.033. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [92] Lee H. 2022. Relative efficacy of (225)Ac-PSMA-617 and (177)Lu-PSMA-617 in prostate cancer based on subcellular dosimetry. *Mol Imaging Radionucl Ther* 31(1): 1-6, PMID: 35114745. DOI: 10.4274/mirt.galenos.2021.63308. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [93] Ruigrok EAM, van Vliet N, Dalm SU, de Blois E, van Gent DC, Haeck J, de Ridder C, Stuurman D, Konijnenberg MW, van Weerden WM, de Jong M and Nonnekens J. 2021. Extensive preclinical evaluation of lutetium-177-labeled PSMA-specific tracers for prostate cancer radionuclide therapy. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 48(5): 1339-1350, PMID: 33094433. DOI: 10.1007/s00259-020-05057-6. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [94] Zurth C, Koskinen M, Fricke R, Prien O, Korjamo T, Graudenz K, Denner K, Bairlein M, von Bühler CJ, Wilkinson G and Gieschen H. 2019. Drug-drug interaction potential of darolutamide: in vitro and clinical studies. *Eur J Drug Metab Pharmacokinet* 44(6): 747-759, PMID: 31571146. DOI: 10.1007/s13318-019-00577-5. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [95] Banerjee SR, Kumar V, Lisok A, Chen J, Minn I, Brummet M, Boinapally S, Cole M, Ngen E, Wharram B, Brayton C, Hobbs RF and Pomper MG. 2019. (177)Lu-labeled low-molecular-weight agents for PSMA-targeted radiopharmaceutical therapy. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 46(12): 2545-2557, PMID: 31399803. DOI: 10.1007/s00259-019-04434-0. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [96] Khreish F, Ghazal Z, Marlowe RJ, Rosar F, Sabet A, Maus S, Linxweiler J, Bartholomä M and Ezziddin S. 2022. 177 Lu-PSMA-617 radioligand therapy of metastatic castration-resistant prostate cancer: Initial 254-patient results from a prospective registry (REALITY Study). *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 49(3): 1075-1085, PMID: 34494131. DOI:10.1007/s00259-021-05525-7. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [97] Tschan VJ, Borgna F, Busslinger SD, Stirn M, Rodriguez JMM, Bernhardt P, Schibli R and Müller C. 2022. Preclinical investigations using [(177)Lu] Lu-Ibu-DAB-PSMA toward its clinical translation for radioligand therapy of prostate cancer. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 49(11): 3639-3650, PMID: 35635566. DOI: 10.1007/s00259-022-05837-2. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [98] Fendler WP, Stuparu AD, Evans-Axelsson S, Lückert K, Wei L, Kim W, Poddar S, Said J, Radu CG, Eiber M, Czernin J, Slavik R and Herrmann K. 2017. Establishing (177)Lu-PSMA-617 radioligand therapy in a syngeneic model of murine prostate cancer. *J Nucl Med* 58(11): 1786-1792, PMID: 28546332. DOI: 10.2967/jnumed.117.193359. Abstract/FREE Full TextGoogle Scholar
- [99] Rathkopf DE and Scher HI. 2018. Apalutamide for the treatment of prostate cancer. *Expert Rev Anticancer Ther* 18(9): 823-836, PMID: 30101644. DOI: 10.1080/14737140.2018.1503954. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [100] Eberli D, Kranzbühler B, Prause L, Baumgartner V, Preda S, Sousa R, Lehner F and Salemi S. 2022. Apalutamide and autophagy inhibition in a xenograft mouse model of human prostate cancer. *J Cancer Res Clin Oncol* 148(12): 3351-3360, PMID: 35751683. DOI: 10.1007/s00432-022-04059-1. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [101] Saini NK, Gabani BB, Todmal U, Sulochana SP, Kiran V, Zainuddin M, Balaji N, Polina SB, Srinivas NR and Mullangi R. 2021. Pharmacokinetics of darolutamide in mouse – assessment of the disposition of the diastereomers, key active metabolite and interconversion phenomenon: implications to cancer patients. *Drug Metab Lett* 14(1): 54-65, 2021. PMID: 32436836. DOI: 10.2174/1872312814666200521091236. CrossRefPubMedGoogle Scholar
- [102] Nykänen P, Korjamo T, Gieschen H, Zurth C and Koskinen M. 2020. Pharmacokinetics of darolutamide, its diastereomers and active metabolite in the mouse: Response to Saini NK et al. (2020). *Drug Metab Lett* 14(1): 9-16, 2021. PMID: 33183216. DOI: 10.2174/1872312814666201112121129. CrossRefPubMedGoogle Scholar

Recepción: 23.10.2025

Revisión: 06.11.2025

Publicación: 15.01.2026

<https://orcid.org/0000-0002-5097-1345>

LAS BATERÍAS DE ION-LITIO: FUNCIONAMIENTO, COMPOSICIÓN, PELIGROS E IMPACTO AMBIENTAL

LITHIUM-ION BATTERIES: OPERATION, COMPOSITION,
HAZARDS, AND ENVIRONMENTAL IMPACT

José Antonio Guevara-García

Laboratorio de Investigación en Bioinorgánica y
Biorremediación. Facultad de Cs. Básicas, Ingeniería
y Tecnología, Universidad Autónoma de Tlaxcala.
Carr. a Apizaquito S/N, Apizaco, Tlaxcala, México.

Correos:
joseantonio.guevara@uatx.mx

Resumen

En este artículo se aborda el tema de las baterías de ion-Li de una manera integral, es decir, en sus aspectos de su composición, principio de funcionamiento, problemáticas ambientales y sociales, y su reciclado. Derivadas de la discusión del funcionamiento e inactivación, se desprenden conclusiones que dan lugar a prácticas seguras de utilización y desecho, mientras que la mención del origen de los materiales componentes debe generar conciencia ecológica y social en el público para evitar el uso indiscriminado de estos y las prácticas abusivas de las corporaciones que los fabrican. También se hace mención del riesgo por contaminación con los metales componentes de las baterías, así como los riesgos potenciales para la salud humana que esto significa. Por último, se hace hincapié en los beneficios del reciclado para impulsar iniciativas en este sentido.

Palabras clave: baterías ion-Li, composición, funcionamiento, problemáticas, reciclado.

Abstract

This article addresses Li-ion batteries comprehensively, including their composition, operating principles, environmental and social issues, and recycling. The discussion of their functioning and deactivation leads to conclusions that lead to safe use and disposal practices, while mentioning the origin of the component materials should raise environmental and social awareness among the public to avoid their indiscriminate use and the abusive practices of the corporations that manufacture them. Mention is also made of the risk of contamination with the metal components of batteries, as well as the potential risks to human health that this entails. Finally, the benefits of recycling are emphasized to promote initiatives in this regard.

Keywords: Li-ion batteries, composition, operation, problems, recycling.

Introducción

Las baterías de ion-litio (BIL) son cada vez más utilizadas en nuestra sociedad. Son empleadas en teléfonos móviles, computadoras móviles, cámaras, vehículos eléctricos y dispositivos para almacenar energía solar y eólica; conforme avanza la tecnología de las BIL, los fabricantes logran un mayor voltaje por celda y cuentan con la densidad de carga más alta que cualquier otra tecnología comercial, mientras que funcionan en un amplio intervalo de temperatura con un número de ciclos de carga-descarga que va de 5000 a 10000 (Whittingham, 2020).

Las BIL están compuestas por varios metales valiosos como hierro, aluminio, níquel, cobre, litio y cobalto; este último es el de mayor interés a la hora de reciclar las BIL usadas, debido a su costo y poca abundancia (Choi, 2022). Cabe señalar que el 76% de cobalto producido a nivel mundial se utiliza en la industria de las BIL (Cobalt Institute, 2025). Mientras que el 87% de la producción mundial de litio se emplea en la producción de baterías (Government Canada, 2025), alcanzando una producción de 240,000 toneladas métricas en 2024, misma que necesitará incrementarse significativamente para 2030, debido al rápido aumento de la fabricación de automóviles eléctricos.

Cuando las BIL cumplen con su tiempo de vida útil estas simplemente son desechadas a la basura debido a la falta de una educación ecológica adecuada en el país. Actualmente, las prácticas de reciclaje de pilas y baterías en México son casi nulas, por lo que es importante incorporar técnicas de manejo de residuos que sean aprovechados en beneficio de la sociedad y el impacto positivo al medio ambiente (Parraguirre, 2019). Las BIL gastadas que terminan en tiraderos o simplemente son tiradas de manera irresponsable son causantes de la contaminación por cobalto (Co) y litio (Li) del suelo y de los cuerpos de agua subterránea, ya que cuando llueve sus componentes son lixiviados. Además, la gran demanda de BIL traerá consigo el agotamiento de Li y Co, dos recursos no renovables.

Pero el problema no se limita a la contaminación. En el Congo, unos 40,000 niños y niñas trabajan en las minas de cobalto (Frankel, 2016); en el triángulo del “oro blanco” entre Bolivia, Perú y Argentina, las plantas de extracción de litio depredan el agua mientras que las comunidades de la región tienen que abastecerse pagando camiones cisterna (Whoriskey, 2016); el grafito, soporte electrolítico de las BIL, se obtiene principalmente de China, a un alto costo ambiental: aire casi irrespirable, cultivos dañados, hogares y pertenencias cubiertas de hollín y agua potable contaminada (B&HRRC, 2017).

¿Qué podemos hacer como consumidores de estos dispositivos? Se ha remarcado que la sociedad debe cambiar el hábito de consumo devastador a una economía circular, donde el reciclado es la base del ciclo de vida de cada producto (Guevara-García & Montiel-Corona, 2014). En el contexto nacional, la generación de tecnología propia de reciclado y recuperación posibilitaría la creación de empresas, generando empleos, activando la economía y posibilitando las condiciones de independencia tecnológica, política y económica.

En este contexto, este artículo contribuye a la difusión del conocimiento en este tipo de dispositivos en los aspectos de su funcionamiento, composición, peligros e impacto ambiental, con el propósito de generar conciencia para impulsar iniciativas de investigación y desarrollo en el campo del reciclado de las BIL.

Componentes de una batería de ion Litio

Una BIL convencional se compone de un cátodo, un ánodo, un separador, una disolución electrolítica, colectores (láminas de aluminio y cobre), carcasas protectoras y contenedores (Golmohammadzadeh, 2018). En la figura 1 se muestran los componentes que conforman una BIL y sus proporciones.



Contribución en peso (%): Ánodo 35, cátodo 18, plástico 6, electrolito 11, contenedor 26, pérdida 4.

Figura 1. Componentes de una Batería de Ion-Litio y su contribución en peso. Elaboración propia.

El cátodo poroso es el lado positivo de la batería, generalmente hecho de un óxido de metal de transición con un aglutinante polimérico y un aditivo conductor. El ánodo poroso es el lado negativo de la batería, generalmente hecho de grafito con un aglutinante polimérico y un aditivo conductor. El separador polimérico poroso permite que los iones de litio del electrolito viajen del ánodo al cátodo, pero impide el contacto eléctrico entre ambos electrodos.

Un colector de corriente de aluminio proporciona una vía para que los electrones entren y salgan del cátodo. El electrolito que llena el espacio poroso del ánodo, el separador y el cátodo, permitiendo que los iones de litio se muevan entre ambos electrodos.

El cátodo consiste en una lámina de aluminio recubierta con material catódico que contiene los metales valiosos principalmente como óxidos. Los materiales activos del cátodo están hechos de varios compuestos tales como LiMPO_4 ($M = \text{Co}, \text{Mn}, \text{Fe}$), LiMO_2 ($M = \text{Co}, \text{Ni}, \text{Mn}$) y en algunos casos LiV_3O_8 y $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$

(Chagnes, 2013). A pesar de todos los avances tecnológicos, el LiCoO_2 es el material catódico más común debido a la alta densidad de energía específica, que proporciona estabilidad al dispositivo (Zeng, 2014). Es el cátodo donde se encuentran el Li y el Co, los dos metales de mayor interés en una LIB usada.

El ánodo consiste en una lámina de cobre que está recubierta con grafito. El electrolito de las BIL es una mezcla de sales de litio (LiPF_6 , LiAsF_6 , LiClO_4 , LiCF_3SO_3 , $\text{Li}(\text{SO}_2\text{CF}_3)_2$ y LiBF_4) y disolventes orgánicos (carbonato de dimetilo o carbonato de etileno y carbonato de dietilo) (Golmohammadzadeh, 2018), mientras que una película de fluoruro de polivinilideno (PVDF) separa el cátodo y el ánodo evitando el contacto eléctrico entre las respectivas láminas de aluminio y cobre (Gratz, 2014).

El material que inicialmente atrajo la atención de los investigadores fue la estructura en capas de los óxidos mixtos de Li (LiMO_2), que incluyen los óxidos de cobalto y litio, los óxidos de níquel y litio, y el manganato de litio.

El LiCoO₂ fue inicialmente descubierto por Goodenough como un material potencial para el desarrollo de baterías (Goodenough, 2018).

Principio de funcionamiento y proceso de inactivación de las BIL

Batería cargada – descargada. Cuando la batería está completamente cargada, los átomos de litio se intercalan en el grafito del ánodo (Figura 2a). Cuando la batería se descarga, los iones de litio salen del ánodo y liberan un electrón. La reacción de media celda es,

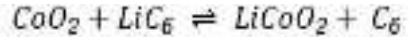


Los iones de litio viajan a través del electrolito hasta el cátodo. Ahí se intercalan en la estructura CoIVO₂, y los electrones que se mueven por el circuito externo, haciendo trabajo eléctrico útil, reducen al cobalto para formar el óxido mixto LiCoO₂, donde tenemos CoIII, la reacción de media celda en el cátodo es la siguiente,



Batería descargada – cargada. Cuando la batería está completamente descargada, los iones de litio se intercalan en el cátodo. Cuando la batería se carga, se produce la reacción inversa: los iones de litio salen del cátodo, pasando al ánodo y el

electrón, a su vez, circula por el circuito externo con la ayuda de una fuente de alimentación. La reacción total es la siguiente,



En la estructura cristalina del LiCoO₂, los octaedros de CoO₆ y los correspondientes de LiO₆ se conectan para formar una configuración entrelazada de capas de iones metálicos y de litio dentro de la celda unitaria hexagonal de iones óxido (Figura 2b) (Reimers & Dahn, 1992).

El LiCoO₂ es un compuesto miembro de la serie LiMO₂ (M=V, Cr, Co, y Ni) que tienen la estructura en capas de la sal de roca. Esta estructura está basada en un empaquetamiento compacto de átomos de oxígeno con los iones Li⁺ y M³⁺ ordenados en planos (111) alternantes dentro de la estructura de sal de roca. Este ordenamiento (111) introduce una ligera distorsión de la red para adaptar simetría hexagonal. Por lo tanto, el LiCoO₂ cristaliza en el grupo espacial R-3m con constantes de celda a = 2.816 Å y c = 14.08 Å. La estructura en capas es del tipo ABCABC que corresponde a las capas triangulares de O-Li-O-Co-O-Li-O (Reimers & Dahn, 1992) (Figura 2b).

Esta estructura permite la transmisión libre de iones Li⁺ en dos dimensiones.

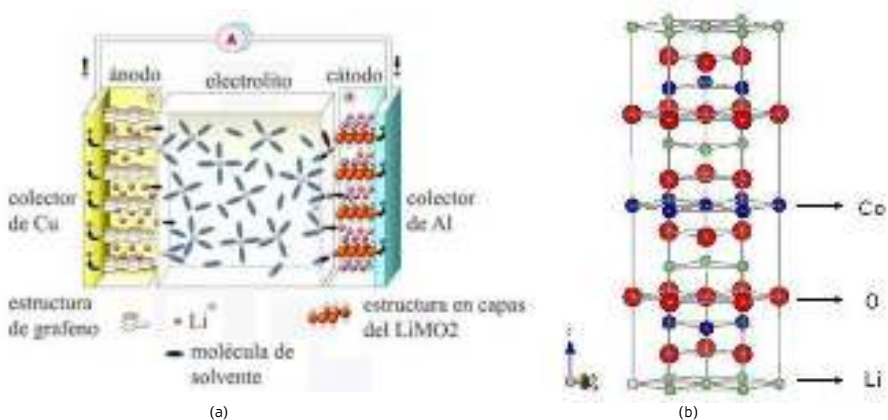


Figura 2. (a) Mecanismo de operación de una batería de ion Li en el modo de descarga. Modificado de Chen et al. (2015).

(b) Diagrama esquemático de la estructura cristalina del LiCoO₂, Tomado de Reimers y Dahn (1992).

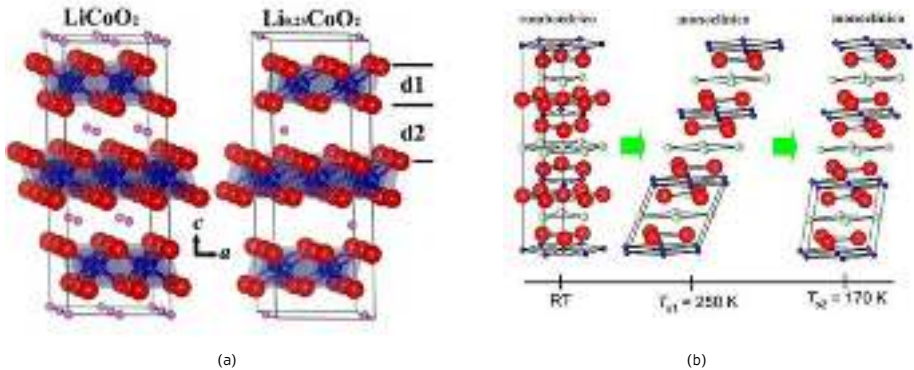


Figura 3. (a) Vistas esquemáticas de las estructuras atómicas del LiCoO_2 y del $\text{Li}_{0.25}\text{CoO}_2$ en representación de esferas y tubos. Las esferas en rojo, en azul, y las moradas, corresponden a los átomos de O, Co y Li, respectivamente. Tomado de Ren et al. (2023). (b) Vistas esquemáticas de las estructuras atómicas del LiCoO_2 y del $\text{Li}_{1.02}\text{Co}_{1.98}$. Tomado de Mukai et al. (2013).

Durante la carga y descarga, el cambio de estado de oxidación del cobalto entre $3+$ y $4+$ involucra solo electrones en el nivel t_{2g} . Esto indica que la red octaédrica de iones no se disturba por la participación del nivel e_g durante el proceso (Xiong et al., 2012). Lo cual mantiene la estabilidad de la red durante la intercalación. Sin embargo, tanto experimentalmente como en la práctica, se ha demostrado que la capacidad del material es solo la mitad de la capacidad teórica ($\sim 140 \text{ mAh/g}$), y el material presenta serios problemas de seguridad debido a su rápida desestabilización en condiciones de carga a voltajes altos. La causa de esta desviación es el cambio de fase cristalina. Reimers & Dahn (1992) demostraron que cuando la extracción de Li^+ excede 0.5, la estructura LiCoO_2 cambia de un sistema hexagonal a uno monoclinico. En el LiCoO_2 monoclinico el Li^+ pierde la habilidad de escapar del cristal. Como esta transición de fase es irreversible, la capacidad de carga-descarga se pierde permanentemente (Figura 3a).

Pero también en la descarga profunda, es decir, cuando los iones Li^+ llegan en exceso al cátodo, es posible el cambio de fase a un sistema monoclinico y la pérdida de la movilidad de los iones Li^+ (Mukai et al., 2013), Figura 3(b).

Otras causas de pérdida de actividad son la formación de cristales de Li metálico en forma de agujas, dendritas, en un proceso que se denomina lithium plating, que puede aparecer por varias razones: aplastamiento, sobrecarga, altas temperaturas, inmersión en agua de mar, maltrato mecánico, cortocircuito (Yuan et al., 2024). Las agujas cristalinas de Li pueden atravesar el ánodo causando daños en el separador y producir cortocircuitos que causan el incendio de los dispositivos (Figura 4).



Figura 4. Fotografía de una batería de ion-Li que se incendió en el laboratorio del autor, durante una práctica. Elaboración propia.

Lo más común es encontrar baterías infladas. En un estudio reciente, Howard y col. (2025), encontraron que las baterías de tipo NCM 21700 (ver más abajo) fueron las más frecuentes y las que más producen gas en condiciones de abuso (alta temperatura y sobrecarga), generando entre 1.29-1.89 L/Ah de gas. La composición del gas varía según el tipo de batería, pero los gases más frecuentes son H₂, CO y CO₂.

Diferentes tecnologías de las BIL

El contenido de metales en las BIL depende de la tecnología utilizada en su construcción. Es importante identificar en este caso cuál es la tecnología de la BIL utilizada en este trabajo como indicativo del tipo de BIL que se utilizan actualmente en nuestro país.

Las BIL comerciales actuales se clasifican en cinco tipos (Fan, 2020), a saber:

1. LiCoO₂ (LCO) series;
2. LiNi_xCoyMnzO₂ (NCM, $x + y + z = 1$) series;
3. LiNi_xCoyAlzO₂ (NCA, $x + y + z = 1$) series;
4. LiMn₂O₄ (LMO) series;
5. LiFePO₄ (LFP) series

Cabe destacar que aún las BIL de la misma tecnología presentan variaciones en su composición, debido a su origen, es decir, del fabricante, de la fuente de materia prima, del país, etc. También se sabe que los fabricantes introducen una cierta cantidad de Mn para disminuir la de Co, que es mucho más caro.

Problemática ambiental causada por el desecho de baterías de Ion-Litio gastadas

La contaminación ambiental causada por la disposición de pilas y baterías usadas debería ser una de las mayores preocupaciones en México, debido al rápido crecimiento de su demanda

como fuentes de energía de equipos electrónicos portátiles, lo que, en ausencia de reciclado, produce miles de toneladas de residuos peligrosos por año (Hernández Pérez, 2019). Las baterías de Ion-Litio gastadas contienen materiales peligrosos, tóxicos, electrolitos inflamables, que representan una amenaza significativa para los sistemas ecológicos y la salud humana (Guo, 2017). Al ser desechadas las baterías de Ion-Litio debido a una mala educación ecológica generalmente son tiradas a la basura, posteriormente estas terminan en tiraderos y cuando llueve los metales contenidos en las LIB's gastadas son lixiviados lo que provoca contaminación del suelo y de las aguas subterráneas que en ocasiones son para el consumo de la población. La liberación de metales tóxicos como el litio (Li) y el cobalto (Co) al medio ambiente es un grave problema de contaminación que afecta la calidad del suelo y el agua, por lo que presenta un peligro directo para la salud humana (Lotfy, 2014).

Contaminación ambiental por Co

La degradación del suelo se ha convertido en un problema mundial, principalmente debido a la deforestación, la erosión y, en particular, la contaminación con oligoelementos (Biro, 2011). La presencia de un contenido excesivo de oligoelementos en el suelo contribuye a una intensa absorción por los microorganismos y las plantas, y estos a su vez pasan a otros seres vivos a lo largo de la cadena trófica.

El contenido de cobalto natural del suelo es de hasta 40 mg/kg (Srivastava et al., 2022). La extracción intensiva de este elemento debido a su amplia aplicación en diversas industrias provoca que se supere el contenido permisible de Co en el suelo como ocurre en República Democrática del Congo y Zambia, donde se encuentran las minas de Co. Otra fuente de contaminación del suelo por Co son los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos, como ocurre con las BIL's gastadas que son tiradas de manera irresponsable a la basura y que cuando llueve el Co, el Li y otros oligoelementos presentes en

estas son lixiviados y terminan siendo fuente de contaminación del suelo y en ocasiones de cuerpos de agua subterránea.

El cobalto se caracteriza por una importante movilidad en las plantas, pero depende de la especie (Srivastava et al., 2022). Las cantidades más grandes de Co se acumulan en las raíces, mientras que las más pequeñas en los tallos y hojas. Una alta acumulación de Co en las plantas provoca reducción del crecimiento y la aparición de necrosis, así como trastornos en la absorción de nutrientes. La absorción excesiva de Co por las plantas representa un problema significativo para su crecimiento y además puede llegar a causar problemas de salud en los seres humanos cuando estas plantas son consumidas de manera recurrente por una alta acumulación de Co, la toxicidad del cobalto tiene efectos perjudiciales para la salud humana, donde se sabe que causa problemas asmáticos, daño hepático e incluso insuficiencia cardíaca (Leysens, 2017).

Problemática socioeconómica por la extracción de Co en el Congo

El cobalto es la materia prima más cara dentro de una batería de ion-litio, su precio fluctuó en el 2017-2018 de \$20,000 a \$26,000 USD/ton (Frankel, 2016; Fan, 2020). El desorden se manifiesta en las condiciones caóticas en que se da la extracción del mineral y las condiciones de vida infrahumanas de los trabajadores, que no se llaman a ellos mismos “mineros” sino “recolectores”, quizás en alusión a que realizan su labor “a mano” (sin herramientas adecuadas).

Contaminación ambiental por Li

El litio es agregado al ecosistema por diversas fuentes, incluidas aguas residuales industriales y recursos hídricos cercanos cerca de la industria relacionada con el Li, salmueras de Li, la producción de baterías de Ion-Litio y también cuando estas son desechadas de manera incorrecta a la basura (Shahzad, 2016). Las concentraciones de Litio en el suelo son de 20 a 30 mg/kg. A diferencia del Co el Li es un metal ligero y no es un elemento esencial, aunque

tiene ciertos beneficios para los seres vivos, este metal al igual que el Co en altas concentraciones y largos periodos de exposición provoca efectos adversos en los seres humanos que son expuestos al litio (Robinson, 2018). El litio es tóxico para los seres humanos en dosis altas de concentraciones sanguíneas de 15 a 20 mg/L y causa náuseas, discapacidad visual, daño renal, coma y paro cardíaco, y últimamente se le ha asociado a disrupción endócrina (Chevalier et al., 2024)). Las vías comunes por las que el litio ingresa a la cadena alimentaria son el agua potable y las plantas, resultado de la contaminación por Li del suelo.

Los iones de litio pueden filtrarse y llegar al agua receptora debido a su característica de movilidad, ya que el Li se considera menos inmovilizado, en comparación con otros oligoelementos y metales pesados. Porque tiene una alta densidad de carga, lo que lo convierte en el más polarizante de todos los metales alcalinos y explica su tendencia a formar enlaces covalentes (Wei et al., 2025).



<https://www.interempresas.net/Electronica/346642-La-basura-electronica-ya-es-la-principal-amenaza-para-el-planeta.html>

Problemática socioeconómica por la extracción de Li en América Latina

La problemática socioeconómica consecuencia de la extracción de litio se desplaza a América Latina; el triángulo del “oro blanco” se encuentra entre Bolivia, Perú y Argentina. Aunque se estima que las reservas de litio son suficientes para los siguientes 300 años, las condiciones en

las que se extrae el mineral son apenas menos grotescas que el cobalto, pero iguales en términos de la explotación de la gente que realiza esta labor; las compañías mineras obtienen estratosféricas sumas de dinero por la comercialización del litio que extraen de la región, pero las comunidades que poseen la tierra se empobrecen rápidamente, luchan para pagar los sistemas de alcantarillado, agua potable y calefacción para las escuelas. El asunto del agua es crítico aquí: las plantas de extracción de litio, que utilizan grandes cantidades de este recurso, profundizarán la escasez existente en la región, que recibe menos de cuatro pulgadas de lluvia al año; todas las comunidades de la zona sufren escasez de agua y muchas de ellas ya se abastecen únicamente de los camiones cisterna (Whoriskey, 2016).

Reciclado y recuperación de metales (Li y Co) a partir de baterías de ion-Litio gastadas

El reciclaje de baterías de ion-Li genera varios beneficios: ambiental, económico y social. En el aspecto ambiental, si extrapolamos a las Baterías de Ion-Li que potencialmente se pueden reciclar en México, esto nos arroja 834,701.13 kg CO₂-eq/Kg de ahorro de emisiones. En el aspecto económico, el valor comercial de los metales recuperados se aproxima a 2.8 millones de USD, siendo esta la primera aproximación que se presenta. En el plano social, el reciclado puede cumplir un papel adicional al de ser una fuente alterna de materias primas: el de aliviar la presión entrópica en los sitios de extracción, lo cual se traduciría, entre otras cosas, en coadyuvar a recuperar los ecosistemas y mejorar las condiciones de vida de los pobladores de los sitios donde se realiza la extracción de metales y materias primas. Además, en el contexto nacional, la generación de tecnología propia posibilita la creación de empresas, generando empleos, activando la economía y posibilitando las condiciones de independencia tecnológica, política y económica (Parra Degante et al., 2019).

Los desechos electrónicos deben tratarse o reciclarse porque son una carga ambiental y

económica. Además, los desechos electrónicos contienen varios metales estratégicos en cantidades mucho mayores que los minerales por unidad de peso (Guevara-García & Montiel-Corona, 2014).

Por ello se han desarrollado varios métodos para la recuperación de iones Li y Co, pero cada vez se buscan técnicas con un enfoque amigable con el medio ambiente. Para reciclar las BLL's gastadas, existen varios enfoques que incluyen principalmente pirometalurgia, hidrometalurgia y bio-hidrometalurgia (Golmohammadzadeh, 2018).

Conclusiones

Las baterías de ion-litio, con su alta densidad energética, han revolucionado nuestra sociedad haciendo que nuestra vida cotidiana haya cambiado en pocos años, pero no todos los cambios han sido benéficos, ha generado una alta dependencia de cobalto y litio, principalmente, y ha desatado impactos sociales en el Congo y América Latina que amenazan la continuidad de estos recursos. A su vez, la disposición irresponsable de estos dispositivos, cuando dejan de ser funcionales, agrava la liberación de metales pesados, que son una amenaza de contaminación tóxica de suelos y aguas.

La gestión de los residuos de baterías de ion-litio y la explotación de Li y Co exigen un cambio de paradigma, tendiente a adoptar una economía circular basada en el reciclaje y la recuperación de metales, que reduzca la huella ambiental y social de su extracción y permita reducir emisiones, mitigar la contaminación y generar empleo y valor económico.

Particularmente, en México, estamos ante una oportunidad de convertir este desafío en desarrollo verdaderamente sostenible. Para lograrlo, es imprescindible impulsar políticas públicas que promuevan la educación ambiental y fomenten la I+D nacional, y que, además, permitan alcanzar la soberanía tecnológica. Solo así cerraremos el ciclo de vida de las BLL y construiremos un modelo energético sostenible y justo.

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 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 a la Revista Digital Internacional de Divulgación Científica del Instituto de Ciencias por dar a conocer las diversas temáticas que deben ser conocidas por los lectores.

Referencias

- B&HRRCC. (2017). Business & Human Rights Resource Centre. Sitio de internet <https://www.business-humanrights.org/en/latest-news/china-graphite-production-for-lithium-ion-batteries-causes-severe-environmental-pollution-complaints-by-villagers-are-suppressed/>
- Biro K., B. P. (2011). LAND USE/LAND COVER CHANGE ANALYSIS AND ITS IMPACT ON SOIL PROPERTIES IN THE NORTHERN PART OF GADARIF REGION, SUDAN. *Land Degradation and Development*, 90-102. doi:<https://doi.org/10.1002/ldr.1116>
- Chagnes Alexandre, B. P. (2013). A brief review on hydrometallurgical technologies for recycling spent lithium ion batteries. *Chem. Technol. Biotechnol.* 1191-1199. doi:<https://doi.org/10.1002/jctb.4053>
- Chen Xiangping, C. L. (2015). Sustainable Recovery of Metals from Spent Lithium-Ion Batteries: A Green Process. *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 3104-3113. doi:<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.5b01000>
- Chevalier, N., Guillou, P., Vigué, C., Fini, J. B., Sachs, L. M., Michel-Caillet, C., & Mhaouty-Kodja, S. (2024). Lithium and endocrine disruption: A concern for human health?. *Environment International*, 190, 108861.
- Choi, J. W., Cho, C. W., & Yun, Y. S. (2022). Organic acid-based linear free energy relationship models for green leaching of strategic metals from spent lithium-ion batteries and improvement of leaching performance. *Journal of Hazardous Materials*, 423, 127214.
- Cobalt Institute. Consultado en septiembre de 2025. Sitio de internet <https://www.cobaltinstitute.org/>
- Fan, E., Li, L., Wang, Z., Lin, J., Huang, Y., Yao, Y., ... & Wu, F. (2020). Sustainable recycling technology for Li-ion batteries and beyond: challenges and future prospects. *Chemical reviews*, 120(14), 7020-7063.
- Frankel, T. C. (30 de September de 2016). THE COBALT PIPELINE. Obtenido de The Washington Post: <https://www.washingtonpost.com/graphics/business/batteries/congo-cobalt-mining-for-lithium-ion-battery/?noredirect=on>
- Golmohammadzadeh Rabeeh, F. F. (2018). Recovery of lithium and cobalt from spent lithium ion batteries (LIBs) using organic acids as leaching reagents: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 418-435. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.024>
- Goodenough, J. B. (2018). How we made the Li-ion rechargeable battery. *Nature Electronics*, 1(3), 204-204.
- Government Canada. Lithium facts. Consultado en septiembre de 2025. Sitio de internet <https://natural-resources.canada.ca/minerals-mining/mining-data-statistics-analysis/minerals-metals-facts/lithium-facts>
- Gratz Eric, Q. S. (2014). A closed loop process for recycling spent lithium ion batteries. *Power Sources*, 255-262. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.03.126>
- Guevara-García, J.A., Montiel-Corona, V. (2014). Pushing Mexico to a Recycle Culture. En el Libro Mexico in Focus: Political, Environmental and Social Issues. José Galindo (Ed.). Nova Science Publishers, Inc. Hauppauge, NY, USA. Capítulo 6, pp. 141-176. Series: Latin American Political, Economic, and Security Issues. ISBN: 978-1-63321-885-7. Available at:
- Guo X., X. C. (2017). Recovery of lithium from the effluent obtained in the process of spent lithium-ion batteries recycling. *Environmental Management*, 84-89. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.062>
- Hernández Pérez, R., García Guzmán, L., Munive Rojas, M.A., Jaramillo Quintero, L.P., Guevara García, J.A. (2019). Reciclaje de pilas y baterías usadas. Parte 1: estudio estadístico. Colección Memorias de los Congresos de la Sociedad Química de México. 54° Congreso Mexicano de Química 38° Congreso Nacional de Educación Química. Trabajos estudiantiles y profesionales de Química Ambiental (QAMB), 100-104. Obtenido de sqm.org.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=259:c-memorias-2019&catid=28&Itemid=101
- Howard, G. E., Buston, J. E., Gill, J., Goddard, S. L., Mellor, J. W., & Reeve, P. A. (2025). The Effects of Cell Chemistry, State of Charge, and Abuse Method on Gas Generation in Li-Ion Cell Failure. *Batteries*, 11(9), 320.
- Howard, G. E., Buston, J. E., Gill, J., Goddard, S. L., Mellor, J. W., & Reeve, P. A. (2025). The Effects of Cell Chemistry, State of Charge, and Abuse Method on Gas Generation in Li-Ion Cell Failure. *Batteries*, 11(9), 320. https://www.novapublishers.com/catalog/product_info.php?products_id=51817&osCsid=fa5fd42131c7f767ea0e87e28ce

- Leysens L., B. V. (2017). Cobalt toxicity in humans—A review of the potential sources and systemic health effects. *Toxicology*, 43-56. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tox.2017.05.015>
- Lotfy S.M., A. M. (2014). Phytoremediation of contaminated soil with cobalt and chromium. *Geochemical Exploration*, 367-373. doi:<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.07.003>
- Mukai, K., Kishida, Y., Nozaki, H., & Dohmae, K. (2013). Structural Phase Transition from Rhombohedral (R 3 m) to Monoclinic (C 2/m) Symmetry in Lithium Overstoichiometric Li1+ Co1- O2- . *Chemistry of Materials*, 25(14), 2828-2837.
- Mukai, K., Kishida, Y., Nozaki, H., & Dohmae, K. (2013). Structural Phase Transition from Rhombohedral (R 3 m) to Monoclinic (C 2/m) Symmetry in Lithium Overstoichiometric Li1+ Co1- O2- . *Chemistry of Materials*, 25(14), 2828-2837.
- Parra Degante, J., Hernández Cortes, J., Mendoza Sarmiento, G., Guevara García, J.A. (2019). Reciclado de pilas y baterías III. Recuperación de metales y manejo sustentable. Colección Memorias de los Congresos de la Sociedad Química de México. 54° Congreso Mexicano de Química 38° Congreso Nacional de Educación Química. Trabajos estudiantiles y profesionales de Química Ambiental (QSUS), 18-39. Obtenido de sqm.org.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=259:c-memorias-2019&catid=28&Itemid=101
- Parraguirre Cuéllar, K., Sánchez López, U., Sánchez González, P., González Contreras, B.M., Guevara García, J.A. 2019. RECICLADO DE PILAS Y BATERÍAS II. ECONOMÍA ENERGÉTICA. COLECCIÓN MEMORIAS DE LOS CONGRESOS DE LA SOCIEDAD QUÍMICA DE MÉXICO. 54° Congreso Mexicano de Química y 38° Congreso Nacional de Educación Química Trabajos estudiantiles y profesionales de Química Ambiental (QAMB). Pag. 96-104. ISSN 2448-914X
- Reimers J, Dahn J. Electrochemical and in situ X-ray diffraction studies of lithium intercalation in LiXCoO2. *J Electrochem Soc.* 1992;139(8):2091-2097
- Ren, J., Zhu, H., Fang, Y., Li, W., Lan, S., Wei, S., ... & Liu, Q. (2023). Typical cathode materials for lithium ion and sodium ion batteries: From structural design to performance optimization. *Carbon Neutralization*, 2(3), 339-377
- Robinson Brett H., R. Y. (2018). Lithium as an emerging environmental contaminant: Mobility in the soil-plant system. *Chemosphere*, 1-6. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.01.012>
- Shahzad Babar, M. T. (2016). Lithium toxicity in plants: Reasons, mechanisms and remediation possibilities – A review. *Plant Physiology and Biochemistry*, 104-115. doi:<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.05.034>
- Srivastava, P., Bolan, N., Casagrande, V., Benjamin, J., Adejumo, S. A., Sabir, M., & Farooqi, Z. U. R. (2022). Cobalt in soils: sources, fate, bioavailability, plant uptake, remediation, and management. In *Appraisal of Metal (loids) in the Ecosystem* (pp. 81-104). Elsevier.
- Wei, W., Pu, S., Yan, C., Yang, H., & Chen, H. (2025). Exploring the mechanisms of lithium neurotoxicity based on network toxicology and molecular docking. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 292, 117911.
- Whittingham, M. S. (2020). Lithium batteries: 50 years of advances to address the next 20 years of climate issues. *Nano Letters*, 20(12), 8435-8437.
- Whoriskey, T. C. (19 de December de 2016). TOSSED ASIDE IN THE "WHITE GOLD" RUSH. Obtenido de The Washington Post: <https://www.washingtonpost.com/graphics/business/batteries/tossed-aside-in-the-lithium-rush/?tid=batterieseriesnav>
- Yuan, Y., Wang, H., Han, X., Pan, Y., Sun, Y., Kong, X., ... & Ouyang, M. (2024). The local lithium plating caused by anode crack defect in Li-ion battery. *Applied Energy*, 361, 122968.
- Zeng Xianlai, J. L. (2014). Recycling of Spent Lithium-Ion Battery: A Critical Review. *Environmental Science and Technology*, 1129-1165. doi:<https://doi.org/10.1080/10643389.2013.763578>

Recepción: 27.10.2025

Revisión: 05.11.2025

Publicación: 15.01.2026

<https://orcid.org/0000-0002-9430-1503>

<https://orcid.org/0000-0002-9501-2017>

<https://orcid.org/0009-0004-7888-9839>

<https://orcid.org/0009-0007-5567-452X>

<https://orcid.org/0000-0002-5742-7772>

<https://orcid.org/0000-0001-7917-3075>

<https://orcid.org/0009-0005-5528-0091>

PROPIEDADES ANTIOXIDANTES Y ANTIMICROBIANAS DE LA FORSITIA: UNA ALTERNATIVA PROMETEDORA EN LA BÚSQUEDA DE TRATAMIENTOS NATURALES Y SEGUROS

ANTIOXIDANT AND ANTIMICROBIAL PROPERTIES OF FORSYTHIA: A PROMISING ALTERNATIVE IN THE SEARCH FOR NATURAL AND SAFE TREATMENTS

* Arnulfo Villanueva Castillo^{1,2}
César Feliciano Pastelín-Rojas^{1,2}
Ruby Sandy Moreno-Mejía¹
Fabiola Rodríguez-Andrade¹
Carlos Gerardo Castillo-Sosa¹
Hermilo Lucio-Castillo³
Raziel Guillermo Luna-Torres¹

¹Facultad de Medicina Veterinaria y
Zootecnia de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

²Cuerpo Académico de Enfermedades Emergentes,
Bioinformática y Dinámica Molecular.

³Unidad Académica Multidisciplinaria Mante
de la Universidad Autónoma de Tamaulipas.

Correos:

arnulfo.villanueva@correo.buap.mx

cesar.pastelin@correo.buap.mx

ruby.moreno@correo.buap.mx

fabiola.rodriguez@correo.buap.mx

carlos.castillo@correo.buap.mx

helucio@docentes.uat.edu.mx

razi.chivaso6@gmail.com

Resumen

La forsitia (*Forsythia virissima*) es una planta originaria de China que ha sido objeto de interés científico debido a sus propiedades antioxidantes y antimicrobianas, así como a compuestos como el ácido cafeico y el ácido clorogénico, que le confieren actividad medicinal y son necesarios para prevenir el daño celular causado por los radicales libres. El estudio de esta planta puede contribuir al desarrollo de nuevos fármacos y terapias basadas en productos naturales, lo que representa una alternativa interesante para la búsqueda de opciones terapéuticas más seguras.

Palabras clave: forsitia, antioxidante, antimicrobiano, tratamiento natural.

Abstract

Forsythia (*Forsythia virissima*) is a plant native to China that has attracted scientific interest for its antioxidant and antimicrobial properties, attributed to compounds such as caffeic and chlorogenic acids, which confer medicinal activity and help prevent damage to cells caused by free radicals. The study of this plant can inform the development of new drugs and therapies based on natural products, offering an interesting alternative in the search for safer therapeutic options.

Keywords: forsythia, antioxidant, antimicrobial, natural treatment.

Introducción

Las plantas medicinales han sido utilizadas desde tiempos ancestrales para tratar diversas afecciones. Entre ellas, la forsitia, una planta originaria de China, ha sido objeto de interés científico por sus propiedades antioxidantes y antimicrobianas. La forsitia contiene compuestos como ácido cafeico y ácido clorogénico (Nishibe et al., 1982), que le confieren una actividad antioxidante, previniendo el daño celular causado por los radicales libres.

Además, estudios han demostrado que la planta presenta actividad antimicrobiana frente a diversos microorganismos patógenos, lo que sugiere su potencial uso como agente terapéutico en infecciones (Qu et al., 2010). El uso de plantas medicinales, como la forsitia, representa una alternativa prometedora para la búsqueda de tratamientos naturales y seguros contra diversas enfermedades.

Forsythia ha sido reconocida por su capacidad para tratar enfermedades como *Escherichia coli*, *Pseudomonas* y *Staphylococcus aureus*, así como procesos inflamatorios, fiebre y heridas, entre otros padecimientos (Burt, 2004; Wang et al., 2018).

En estudios recientes, se han aislado dos compuestos de esta planta, forsythiazide y forsythin, y se ha investigado su actividad antioxidante y antibacteriana. Además, la resistencia a los antibióticos es un problema cada vez más preocupante para los profesionales de la salud, lo que ha llevado a la búsqueda de alternativas naturales a los antibióticos sintéticos convencionales (Qu et al., 2010).

En este contexto, la búsqueda sistemática de la actividad biológica beneficiosa de las plantas medicinales se ha convertido en un enfoque razonable en la investigación sobre nutraceuticos y fármacos. Sin embargo, aunque se estima que hay entre 300 000 y 400 000 especies de árboles en la Tierra, solo se ha investigado una pequeña parte de su fitoquímica y de su función biológica (Kitani et al., 2006).

Por lo tanto, la identificación y evaluación de nuevas plantas con propiedades beneficiosas para la salud, como la forsitia, puede ser un área de investigación prometedora para desarrollar nuevos agentes terapéuticos y nutraceuticos.



https://mx.images.search.yahoo.com/search/images;_ylt=AwrO7i87uipppk00Bbm3D8Qt.;_ylu=Y29sbwNncTEEcG9zAzEEEd-nRpZAMEc2VjA3BpdnM-?p=Forsythia&fr2=piv-web&type=E210MX91215G0&fr=mcafee#id=1&iurl=https%3A%2F2Fwww.jardineriaon.com%2Fwp-content%2Fuploads%2F2018%2F02%2Fforsythia.jpg&action=click

Actividad antioxidante y radicales libres

La teoría de los radicales libres sobre el envejecimiento y los trastornos relacionados con la edad se propuso hace casi medio siglo y ha sido objeto de debate cada vez más en los últimos años. Los nutraceuticos pueden prevenir el desarrollo de muchos trastornos relacionados con la edad, como el cáncer, trastornos cardiovasculares, como la arteriosclerosis y la hipertensión, y posiblemente algunos trastornos degenerativos, enfermedades neurológicas, como la enfermedad de Parkinson y la enfermedad de Alzheimer. Un informe reciente proporciona evidencia adicional de que el consumo de frutas y verduras, como la espinaca y los arándanos, que contienen potentes micronutrientes antioxidantes, puede prevenir y/o revertir la disminución de la función cerebral relacionada con la edad, incluida la función motora e incluso la cognitiva, como la memoria, en ratones envejecidos (Kitani et al., 2006).

El consumo de frutas y verduras se asocia con una menor incidencia y mortalidad por cáncer en múltiples estudios de casos y controles de cohortes humanas en todos los sitios comunes de cáncer. Los efectos anticancerígenos de las verduras también se han observado en experimentos *in vitro*.

La protección de las frutas y verduras contra enfermedades, como el cáncer, las enfermedades cardíacas y cerebrovasculares, se debe a la presencia de varios tipos de antioxidantes en estas frutas y verduras, especialmente vitaminas antioxidantes, como el ácido ascórbico y el R-tocoferol. Sin embargo, la mayor parte de la actividad antioxidante de las frutas o verduras puede atribuirse a sustancias químicas distintas de la vitamina C, la vitamina E o el β -caroteno. Por ejemplo, algunos flavonoides presentes en los alimentos que consumimos tienen actividad antioxidante. También se ha encontrado que los flavonoides tienen un fuerte efecto antioxidante contra los radicales piróxilos como lo hacen la vitamina E, la vitamina C y el glutatión (Cao et al., 1996; Lourenço et al., 2019; Salehi et al., 2018).

No se puede hablar de los antioxidantes sin antes hablar del estrés oxidativo. Es un proceso fisiopatológico que ocurre cuando hay una acumulación excesiva de radicales oxidativos, incluidas especies reactivas de oxígeno (ROS) y especies reactivas de nitrógeno (RNS), que pueden causar daño a diversas macromoléculas biológicas, como el ADN, los lípidos de la membrana celular y las proteínas. Este proceso ha sido asociado con varias enfermedades crónicas relacionadas con el envejecimiento, tales como el cáncer, la arteriosclerosis, la artritis y los trastornos neurodegenerativos. No obstante, el organismo cuenta con un sistema antioxidante que puede eliminar el exceso de radicales oxidativos, el cual incluye componentes no enzimáticos como el glutatión (GSH), el selenio y las vitaminas C y E, así como enzimas antioxidantes como la superóxido dismutasa (SOD) y la glutatión peroxidasa (GSH-Px). Para evaluar el daño mediado por ROS, se utiliza comúnmente el grado de peroxidación lipídica, y la concentración de malondialdehído (MDA) se emplea como biomarcador. En estudios, se ha utilizado el dicuat (dibromuro de 1,1'-etileno-2,2'-dipiridilio) como inductor de estrés oxidativo y se ha investigado el efecto antioxidante de la *Forsythia suspensa* como alternativa natural para mantener un estado oxidativo adecuado. El equilibrio entre la producción de radicales oxidativos y el sistema antioxidante es fundamental para mantener la homeostasis oxidativa y prevenir el daño celular y la enfermedad neuronal (Yousef et al., 2009). En el metabolismo de organismos aeróbicos, el oxígeno es esencial, pero puede causar reacciones adversas; las especies reactivas de oxígeno (ROS) son subproductos de la producción normal de energía celular y de actividades funcionales y desempeñan un papel importante en la señalización celular, la apoptosis, la expresión génica y el transporte de iones. Sin embargo, un aumento brusco en los niveles de ROS puede dañar moléculas clave, como proteínas, lípidos, ARN y ADN. La producción de ROS puede deberse a factores ambientales, como la radiación solar, la exposición al ozono y la contaminación por pesticidas y productos

químicos industriales. Durante mucho tiempo se pensó que el estrés oxidativo aumentaba el riesgo de varias enfermedades, como el cáncer, la diabetes, la esclerosis, la artritis, las enfermedades neurodegenerativas y el envejecimiento prematuro. Los antioxidantes pueden proteger las células mediante varios mecanismos, como la conversión de ROS en especies de radicales libres, la interrupción de la reacción en cadena de oxígeno iniciada por ROS, la autofagia y la reducción de los niveles locales de oxígeno. El consumo de antioxidantes puede apoyar los efectos de la defensa antioxidante. Existe un interés creciente en estudiar el papel de los diferentes tipos de reacción del oxígeno y los antioxidantes pueden proteger contra los efectos dañinos de las ROS (Lourenço et al., 2019).

Las especies reactivas de oxígeno (ROS) se producen como subproductos de reacciones biológicas o de factores exógenos (Halliwell, 2007) y están compuestas por radicales superóxido, radicales hidroxilo, oxígeno libre y peróxido de hidrógeno (Jamshidi-Kia et al., 2020). Aunque algunas ROS pueden tener funciones activas en el organismo, como la producción de energía, la fagocitosis, la regulación del crecimiento celular y la señalización intercelular, también pueden ser perjudiciales. Estos agentes pueden atacar los lípidos de la membrana celular y el ADN, provocando procesos de oxidación que dañan la membrana y causando mutaciones en el ADN que pueden llevar al cáncer.

Por lo tanto, se ha buscado una intervención preventiva contra enfermedades relacionadas con los radicales libres. Se ha demostrado que varios productos vegetales, como los compuestos polifenólicos (por ejemplo, flavonoides y taninos) y los extractos de plantas o hierbas, poseen efectos antioxidantes y podrían ser potentes supresores de las ROS. Las investigaciones han mostrado que estas sustancias pueden prevenir la peroxidación de los lípidos de membrana y reducir la fluidez de la membrana, lo que ayuda a proteger la estructura de las células. Además, estos compuestos tienen el potencial de prevenir o

tratar enfermedades asociadas al estrés oxidativo, como el cáncer y otras enfermedades relacionadas con la edad (Chang et al., 2001).

El interés en los antioxidantes ha aumentado debido a su capacidad para proteger los alimentos y los productos farmacéuticos contra la degradación oxidativa, así como al cuerpo contra el estrés oxidativo. Para evaluar la actividad antioxidante de compuestos derivados de plantas (Popova et al., 2004) y otros productos, se requieren enfoques que aborden el mecanismo de acción antioxidante y se centren en la cinética de las reacciones involucradas. Se han llevado a cabo numerosos estudios para evaluar la actividad antioxidante de diferentes muestras de interés mediante diversos métodos en el ámbito de la alimentación y la salud humana. Los métodos basados en la autooxidación inhibida son más adecuados para los antioxidantes que mejoran la terminación y los que rompen cadenas, mientras que se requieren otros estudios específicos para los antioxidantes preventivos. Además, se revisaron los métodos más utilizados para la determinación *in vitro* de la capacidad antioxidante de los ingredientes alimentarios. Se discutieron sus ventajas, desventajas, limitaciones y su utilidad para moléculas puras y extractos crudos. También se discutieron el efecto y la influencia del medio de reacción sobre el rendimiento antioxidante. Por lo tanto, esta revisión proporciona la base y la justificación para el desarrollo de métodos antioxidantes estandarizados para las industrias de alimentos, nutracéuticos y suplementos dietéticos. Además, se discutieron y evaluaron seriamente los principios químicos de varios métodos antioxidantes, incluidos ABTS+, DPPH, FRAP, Cuprac, FCR, ROO-, O2-, H2O2, OH, 1O2 y NO-. También se discutieron los aspectos antioxidantes generales de los principales ingredientes alimentarios mediante varios métodos.

Debido a la información anterior, se observó que las investigaciones se deben a dos vertientes o secciones; la primera sección está dedicada a los ingredientes clave en aplicaciones alimentarias y farmacéuticas, y la segunda sección general

incluye varias definiciones de los principales métodos antioxidantes comúnmente utilizados para determinar la actividad antioxidante de los ingredientes (Gulcin, 2020).

En los últimos años, ha cobrado mucho interés en cómo el estrés oxidativo afecta la fertilidad, como en el caso de la infertilidad en las parejas, que puede deberse a factores que inciden tanto en el hombre como en la mujer. Se estima que entre el 40% y el 50% de las veces la infertilidad se debe a factores que afectan a la mujer y en estos reportes se observó que los antioxidantes reducen el estrés oxidativo. Algunos estudios han explorado la eficacia de los antioxidantes en la mejora de la fertilidad. Una revisión científica evaluó la eficacia de distintos antioxidantes en mujeres con subfertilidad. Se incluyeron 63 ensayos clínicos aleatorios con 7760 mujeres que compararon antioxidantes orales con placebo, ningún tratamiento/tratamiento estándar u otros antioxidantes. La evidencia de baja calidad sugiere que los antioxidantes pueden mejorar las tasas de embarazo clínico en comparación con placebo, sin tratamiento o con tratamiento estándar. Sin embargo, debido a la muy baja calidad de la evidencia, no se sabe con certeza si los antioxidantes mejoran la supervivencia en comparación con placebo o con ningún tratamiento estándar. Se requiere realizar más investigaciones para determinar si los antioxidantes son efectivos para mejorar la fertilidad en mujeres con subfertilidad (Showell et al., 2020).

Factores como la radiación, la contaminación ambiental y el metabolismo de fármacos pueden desencadenar la formación de radicales libres. Estas especies reactivas son neutralizadas por moléculas con propiedades antioxidantes. Los antioxidantes son compuestos que inhiben la oxidación y se conocen como “captadores de radicales libres” porque se combinan con dichos radicales para formar pequeñas especies reactivas. Hay dos tipos de antioxidantes según su origen: exógenos y endógenos. Se ha demostrado que los antioxidantes reducen la incidencia de enfermedades relacionadas con el estrés oxidativo, incluyendo el envejecimiento, el cáncer, la

diabetes, la inflamación, la enfermedad hepática, la enfermedad cardiovascular, las cataratas, la toxicidad renal y los trastornos degenerativos del sistema nervioso. Por lo tanto, se cree que los antioxidantes dietéticos tienen un gran potencial para prevenir estas enfermedades (Neha et al., 2019).

Varios compuestos naturales y sintéticos han sido comparados en cuanto a su capacidad antioxidante en ensayos in vitro relacionados con eritrocitos y se ha observado que las catequinas presentan una alta capacidad de captación de ABTS y una alta reducción del coeficiente químico Fe³⁺ en la prueba FRAP. Además, son eficaces para proteger contra la oxidación inducida por SIN, superando al glutatión y al ascorbato. En particular, la (+)-catequina y la (-)-epicatequina son los compuestos más efectivos en la protección contra la hemólisis inducida por AAPH, mientras que (-)-galato de epicatequina, (-)-galato epigallocatequina, (-)-galato de epicatequina y (-)-epicatequina galato-epigallocatequina se protegen a concentraciones más bajas contra la hemólisis inducida por hipoclorito. Por otra parte, las catequinas son más eficaces para inhibir la oxidación inducida por AAPH de la 2'7'-diclorodihidrofluoresceína en los eritrocitos. Debido a sus excelentes propiedades antioxidantes, las catequinas y otros flavonoides son ideales para su uso en nanoformulaciones terapéuticas (Grzesik et al., 2018).

Actividad antibacteriana en la resistencia bacteriana

El uso de nanopartículas de plata (AgNP) desempeña un papel importante en los campos de la biología y la medicina, y se han utilizado como agentes antimicrobianos y antifúngicos en una amplia variedad de productos. Sin embargo, las AgNP se preparan mediante una serie de técnicas químicas y físicas; a menudo se asocian con un alto consumo de energía o con usos tóxicos, lo que limita su empleo. Por tal motivo, se están incrementando las publicaciones sobre la síntesis ecológica de AgNP mediante métodos respetuosos con el medio ambiente, incluidos los biológicos, fotoquímicos y electroquímicos. El

desarrollo de procesos en la intersección entre la nanotecnología y la biología para la síntesis de nanopartículas se está convirtiendo en una ruta alternativa. Muchos de los métodos biológicos para la síntesis de AgNP, que utilizan microorganismos o extractos de plantas, se consideran respetuosos con el medio ambiente. En comparación con los microorganismos, los extractos de plantas constituyen la mejor plataforma biológica para la síntesis de AgNP, ya que los principios activos pueden proporcionar agentes naturales limitantes que estabilizan las AgNP. Los agentes antimicrobianos son importantes en la producción y conservación de alimentos, porque reducen el riesgo de contaminación microbiana y deterioro. Sin embargo, el marcado aumento de la resistencia a los antibióticos de los patógenos en general es una de las preocupaciones de los investigadores hoy en día (Du et al., 2019).

La resistencia a los antibióticos es un problema importante para los especialistas médicos, y el desarrollo de agentes antibacterianos alternativos de origen natural ha atraído una atención considerable en los últimos años. En este estudio, investigamos la actividad antibacteriana de los frutos de *Forsythia suspensa* mediante métodos *in vitro*. Aislamos dos compuestos distintivos (forsitiasida y forsitina) de frutos de *F. suspensa* y evaluamos su actividad antimicrobiana frente a *Escherichia coli*, *Pseudomonas* y *Staphylococcus aureus*. Los resultados mostraron que tanto la forsitiasida como la forsitina exhibieron actividad antimicrobiana significativa contra las tres cepas bacterianas analizadas.

Se encontró que la concentración de estos compuestos influye en la actividad antimicrobiana frente a *E. coli*. Estos hallazgos sugieren que los frutos de *F. suspensa* tienen potencial como agentes antibacterianos naturales. Se necesitan más estudios para investigar la eficacia de los frutos de *F. suspensa in vivo* y su uso potencial como alternativa a los antibióticos sintéticos. El uso de productos naturales como agentes antibacterianos podría ayudar a redu-

cir la resistencia a los antibióticos y brindar una alternativa más segura para la salud humana (Qu et al., 2010).

Se ha demostrado que los aceites esenciales (AE) poseen propiedades antibacterianas frente a una variedad de patógenos transmitidos por los alimentos. Los estudios *in vitro* han demostrado que los AE pueden ser efectivos contra *Listeria monocytogenes*, *Salmonella typhimurium*, *Escherichia coli* O157:H7, *Shigella dysenteriae*, *Bacillus cereus* y *Staphylococcus aureus* en concentraciones que oscilan entre 0,2 y 10 µl/ml. Las bacterias grampositivas son generalmente más susceptibles a los AE que las bacterias gramnegativas. Se han identificado varios componentes de AE como antibacterianos eficaces, entre ellos eugenol, carvacrol, timol y cinamaldehído. Se cree que la actividad antibacteriana de los aceites esenciales se debe a su capacidad para alterar la membrana y/o la pared celular de las bacterias. Esta interrupción puede provocar la fuga de componentes intracelulares y, en última instancia, la muerte celular. Además, algunos componentes de AE pueden interferir con el metabolismo bacteriano o inhibir la producción de factores de virulencia. Si bien los aceites esenciales se muestran prometedores como alternativas naturales a los conservantes de alimentos tradicionales, aún existen varios desafíos que deben abordarse antes de que puedan adoptarse ampliamente en la industria alimentaria. Estos desafíos incluyen problemas relacionados con la estabilidad, la solubilidad y las propiedades sensoriales. Además, las preocupaciones de seguridad relacionadas con la toxicidad y la alergenicidad deben evaluarse cuidadosamente antes de que los AE puedan usarse en productos alimenticios (Burt, 2004).

Los flavonoides son compuestos naturales que se encuentran en plantas que han demostrado tener actividad antibacteriana. En artículos de revisión proporciona una actualización de las últimas investigaciones sobre las propiedades antibacterianas de los flavonoides y su relación estructura-actividad. Estas verificaciones destacan que algunos flavonoides han mostrado

actividades antibacterianas hasta seis veces más potentes que los medicamentos estándar en el mercado. Los derivados sintéticos de los flavonoides también han exhibido notables actividades antibacterianas, con potencias de 20 a 80 veces mayores que el fármaco estándar contra bacterias gramnegativas y grampositivas multirresistentes. El artículo concluye que los flavonoides tienen un gran potencial como fuente de nuevos agentes antibacterianos para combatir la resistencia a los antibióticos. Se necesita más investigación para explorar los mecanismos de acción de los flavonoides y su potencial de uso clínico (Farhadi et al., 2019).

El último informe publicado por la Organización Mundial de la Salud ha identificado la resistencia a los antimicrobianos como un problema de salud mundial y un desafío importante en el tratamiento de infecciones asociadas a patógenos multirresistentes. Para abordar esta cuestión, se han adoptado diversas estrategias, entre ellas el descubrimiento de nuevos agentes antimicrobianos que muestran diferentes mecanismos de acción y la prevención de la formación de biopelículas y bombas de resistencia a múltiples fármacos en bacterias. Los productos naturales, incluyendo alcaloides, terpenoides, esteroides, antraquinonas, flavonoides, saponinas, taninos, etc., se han propuesto para combatir cepas bacterianas multirresistentes debido a sus efectos farmacológicos versátiles. Entre estos productos naturales, los flavonoides, también conocidos como compuestos polifenólicos, han sido valorados por su capacidad para retrasar el crecimiento de una amplia variedad de microorganismos patógenos, incluidas bacterias multirresistentes. Se ha investigado ampliamente la hidroxilación en C5, C7, C3' y C4', así como la geranilación o prenilación en C6, para mejorar la inhibición de los flavonoides bacterianos. Sin embargo, se ha demostrado que la metoxilación en C3' y C5 reduce los efectos antibacterianos de los flavonoides. Esta revisión resume la información más reciente sobre la actividad antibacteriana de los flavonoides, prestando especial atención a las relaciones estructura-actividad de este amplio grupo de compuestos naturales para

explorar los agentes antibacterianos seguros y eficaces como productos naturales (Shamsudin et al., 2022).

La actividad antibacteriana de compuestos bioactivos presentes en frutas, verduras, especias y plantas medicinales, específicamente flavonoides y ácidos orgánicos, se debe a sus fuertes propiedades antioxidantes y antiinflamatorias. Se probaron 13 flavonoides comunes y 6 ácidos orgánicos contra cepas clínicas de cuatro especies de bacterias patógenas. Todos los compuestos probados mostraron propiedades antimicrobianas; sin embargo, su actividad biológica fue moderada o relativamente baja. El ácido salicílico fue el más efectivo, con concentraciones inhibitorias mínimas de 250-500 g/mL. Estos compuestos fueron más activos contra las bacterias gramnegativas, como *Escherichia coli* y *Pseudomonas aeruginosa*, que contra las grampositivas, como *Enterococcus faecalis* y *Staphylococcus aureus*. Además, se observó que la presencia de grupos hidroxilo en los anillos de fenilo A y B normalmente no influía en el nivel de actividad antibacteriana, aunque sí se observó un aumento significativo en la actividad de los derivados hidroxilados de la flavona frente a *S. aureus*. La presencia y la posición del grupo azúcar en los glucósidos de flavona tampoco tuvieron efecto sobre los valores de concentración inhibitoria mínima. En general, estos resultados sugieren que los flavonoides y los ácidos orgánicos pueden ser útiles como agentes antimicrobianos, aunque se requiere una mayor investigación para determinar su eficacia y sus mecanismos de acción en distintas cepas bacterianas (Adamczak et al., 2020).

Los flavonoides son una clase de metabolitos secundarios presentes en las plantas y su actividad antimicrobiana está recibiendo atención. Con el fin de establecer una relación entre los parámetros fisicoquímicos y la actividad antimicrobiana de los flavonoides, se han desarrollado ecuaciones de regresión que relacionan el ACD/LogP o el LogD7.40 con las concentraciones inhibitorias mínimas (MIC) contra bacterias grampositivas. Estas ecuaciones se han verifi-

cado con otros 68 flavonoides reportados. Con base en estas ecuaciones, se pueden calcular las CIM de la mayoría de los flavonoides contra las bacterias grampositivas, que se espera que sean alrededor de 10,2 o 4,8 μM , y probablemente entre 2,6 y 10,2 μM , o 1,2-4,8 μM . La hidrofilia es un factor clave para la actividad antimicrobiana de los flavonoides contra las bacterias grampositivas, como lo evidencian dos curvas de regresión cóncavas. Además, se sugiere que la membrana celular es el sitio principal de acción de los flavonoides en las bacterias grampositivas y puede estar involucrada en la destrucción de la bicapa de fosfolípidos, la inhibición de la cadena respiratoria o la síntesis de ATP, entre otros posibles mecanismos (Yuan et al., 2021).

Los flavonoides bioactivos presentes en *Asplenium nidus* (helecho) exhiben actividad antitumoral, antibacteriana y antioxidante, lo que los hace prometedores para la prevención de enfermedades y de patógenos multirresistentes como *Proteus mirabilis*, *Proteus vulgaris* y *Pseudomonas aeruginosa*. Se utilizó cromatografía de gases y espectrometría de masas (GC/MS) para fraccionar e identificar los flavonoides

presentes. Las fracciones 1 y 3 mostraron la presencia de doce compuestos conocidos y tres desconocidos, representando el 13,12 % y 2,61 % de la composición total, respectivamente. El gliciridin 7-O-hexósido, quercetina-7-O-rutinósido, keampferol-3-O-rutinósido y miricetina-3-O-ramnósido fueron los flavonoides más abundantes. Los componentes purificados y las fracciones presentes demostraron actividad antibacteriana y antioxidante contra los patógenos MDR en dilución microambiente, con MIC50 para amoxicilina, gliciridin7-O-hexósido y quercetina-7-O-rutinósido entre 0,0003-0,06 g/mL, 0,004-0,06 g/mL y 0,005-6,0 g/mL, respectivamente. La actividad inhibitoria de gliciridin-7-O-hexósido y quercetina-7-O-rutinósido fue similar a la del antibiótico estándar amoxicilina. Además, las fracciones de *A. nidus* demostraron actividad citotóxica en células de cáncer de hígado humano HepG2 y en células de carcinoma humano HeLa. En general, estos hallazgos respaldan el potencial terapéutico de los flavonoides de *A. nidus* y justifican su uso en la medicina popular y etnográfica para tratar enfermedades infecciosas y el cáncer (Jarial et al., 2018).



https://mx.images.search.yahoo.com/search/images;_ylt=Awr07i87u1ppk00Bbm3D8Qt.;_ylu=Y29sbwN-nTEEcG9zAzEEdnRpZAMEc2VjA3BpdnM-?p=Forsytia&fr2=piv-web&type=E210MX91215G0&fr=mcafee#id=11&iurl=https%3A%2F%2Fwww.plantasmania.com%2Fwp-content%2Fuploads%2F2023%2F06%2Fforsytia-planta-cuidados-y-consejos-para-su-cultivo-en-casa.jpg&action=click

Conclusión

La Forsythia ha captado el interés de la comunidad científica por sus propiedades antioxidantes y antimicrobianas, con un alto potencial terapéutico. Los compuestos presentes en esta planta, como el ácido cafeico y el ácido clorogénico, son responsables de su actividad antioxidante, que ayuda a prevenir el daño celular causado por los radicales libres. Además, la Forsythia ha demostrado ser eficaz en la lucha contra diversos microorganismos patógenos, lo que la convierte

en una alternativa prometedora en la búsqueda de tratamientos naturales y seguros para diversas enfermedades. La investigación sobre las propiedades de esta planta puede aportar información valiosa al desarrollo de nuevos fármacos y terapias basadas en productos naturales. En consecuencia, la Forsythia se ha convertido en un objeto de interés científico en la búsqueda de nuevos tratamientos para una amplia gama de enfermedades.

Declaración de no conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de interés alguno

Declaración de privacidad

Se sugiere ingresar los siguientes párrafos.

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, pueden compartirse 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.

Referencias

- Adamczak, A., Ożarowski, M., & Karpiński, T. M. (2020). Antibacterial activity of some flavonoids and organic acids widely distributed in plants. *Journal of Clinical Medicine*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/jcm9010109>
- Burt, S. (2004). Essential oils: Their antibacterial properties and potential applications in foods - A review. *International Journal of Food Microbiology*, 94(3), 223–253. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2004.03.022>
- Cao, G., Sofic, E., & Prior, R. L. (1996). Antioxidant Capacity of Tea and Common Vegetables. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 44(11), 3426–3431. <https://doi.org/10.1021/jf9602535>
- Chang, S. T., Wu, J. H., Wang, S. Y., Kang, P. L., Yang, N. S., & Shyur, L. F. (2001). Antioxidant activity of extracts from acacia confusa Bark and Heartwood. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(7), 3420–3424. <https://doi.org/10.1021/JF0100907>
- Du, J., Hu, Z., Yu, Z., Li, H., Pan, J., Zhao, D., & Bai, Y. (2019). Antibacterial activity of a novel *Forsythia suspensa* fruit mediated green silver nanoparticles against food-borne pathogens and mechanisms investigation. *Materials Science and Engineering C*, 102, 247–253. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.04.031>
- Farhadi, F., Khameneh, B., Iranshahi, M., & Iranshahi, M. (2019). Antibacterial activity of flavonoids and their structure–activity relationship: An update review. *Phytotherapy Research*, 33(1), 13–40. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ptr.6208>
- Grzesik, M., Naparło, K., Bartosz, G., & Sadowska-Bartosz, I. (2018). Antioxidant properties of catechins: Comparison with other antioxidants. *Food Chemistry*, 241, 480–492. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.08.117>
- Gulcin, İ. (2020). Antioxidants and antioxidant methods: an updated overview. *Archives of Toxicology*, 94(3), 651–715. <https://doi.org/10.1007/s00204-020-02689-3>
- Halliwell, B. (2007). Inflammation Biochemistry of oxidative stress. <http://www.oup.com>
- Jamshidi-Kia, F., Wibowo, J. P., Elachouri, M., Masumi, R., Salehifard-Jouneghani, A., Abolhassanzadeh, Z., & Lorigooini, Z. (2020). Battle between plants as antioxidants with free radicals in human body. *Journal of HerbMed Pharmacology*, 9(3), 191–199. <https://doi.org/10.34172/jhp.2020.25>
- Jarial, R., Thakur, S., Sakinah, M., Zularisam, A. W., Sharad, A., Kanwar, S. S., & Singh, L. (2018). Potent anticancer, antioxidant and antibacterial activities of isolated flavonoids from *Asplenium nidus*. *Journal of King Saud University - Science*, 30(2), 185–192. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jksus.2016.11.006>
- Kitani, K., Minami, C., Yamamoto, T., Maruyama, W., Kanai, S., Ivy, G. O., & Carrillo, M.-C. (n.d.). Do Antioxidant Strategies Work against Aging and Age-associated Disorders? Propargylamines: A Possible Antioxidant Strategy.
- Lourenço, S. C., Moldão-Martins, M., & Alves, V. D. (2019). Antioxidants of natural plant origins: From sources to food industry applications. In *Molecules* (Vol. 24, Issue 22). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/molecules24224132>
- Neha, K., Haider, M. R., Pathak, A., & Yar, M. S. (2019). Medicinal prospects of antioxidants: A review. In *European Journal of Medicinal Chemistry* (Vol. 178, pp. 687–704). Elsevier Masson SAS. <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2019.06.010>
- Nishibe, S., Okabe, K., Tsukamoto, H., Sakushima, A., & Hisada, S. (1982). The Structure of Forsythiaside isolated from *Forsythia suspensa*. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*, 30(3), 1048–1050. <https://doi.org/10.1248/CPB.30.1048>
- Popova, M., Bankova, V., Butovska, D., Petkov, V., Nikolova-Damyanova, B., Sabatini, A. G., Marcazzan, G. L., & Bogdanov, S. (2004). QUANTIFICATION OF CONSTITUENTS OF PROPOLIS 235 Validated Methods for the Quantification of Biologically Active Constituents of Poplar-type Propolis. *PHYTOCHEMICAL ANALYSIS Phytochem. Anal*, 15, 235–240. <https://doi.org/10.1002.pca.777>

- Qu, H., Zhang, Y., Wang, Y., Li, B., & Sun, W. (2010). Antioxidant and antibacterial activity of two compounds (forsythiaside and forsythin) isolated from *Forsythia suspensa*. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 60(2), 261–266. <https://doi.org/10.1211/jpp.60.2.0016>
- Salehi, B., Martorell, M., Arbiser, J. L., Sureda, A., Martins, N., Maurya, P. K., Sharifi-Rad, M., Kumar, P., & Sharifi-Rad, J. (2018). Antioxidants: Positive or negative actors? In *Biomolecules* (Vol. 8, Issue 4). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/biom8040124>
- Shamsudin, N. F., Ahmed, Q. U., Mahmood, S., Shah, S. A. A., Khatib, A., Mukhtar, S., Alsharif, M. A., Parveen, H., & Zakaria, Z. A. (2022). Antibacterial Effects of Flavonoids and Their Structure-Activity Relationship Study: A Comparative Interpretation. In *Molecules* (Vol. 27, Issue 4). MDPI. <https://doi.org/10.3390/molecules27041149>
- Showell, M. G., Mackenzie-Proctor, R., Jordan, V., & Hart, R. J. (2020). Antioxidants for female subfertility. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 8. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD007807.pub4>
- Wang, Z., Xia, Q., Liu, X., Liu, W., Huang, W., Mei, X., Luo, J., Shan, M., Ma, Z., & Lin, R. (2018). Phytochemistry, pharmacology, quality control and future research of *Forsythia suspensa* (Thunb.) Vahl: A review. *Journal of Ethnopharmacology*, 210, 318–339. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2017.08.040>
- Yousef, M. I., Saad, A. A., & El-Shennawy, L. K. (2009). Protective effect of grape seed proanthocyanidin extract against oxidative stress induced by cisplatin in rats. *Food and Chemical Toxicology*, 47(6), 1176–1183. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2009.02.007>
- Yuan, G., Guan, Y., Yi, H., Lai, S., Sun, Y., & Cao, S. (2021). Antibacterial activity and mechanism of plant flavonoids to gram-positive bacteria predicted from their lipophilicities. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90035-7>

Recepción: 19.11.2025

Revisión: 24.11.2025

Publicación: 15.01.2026

<https://orcid.org/0000-0003-4392-7028>

<https://orcid.org/0009-0005-5091-8543>

<https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

DE LA CAÑA DE AZÚCAR A LA GASOLINA: LA CIENCIA DETRÁS DEL E10 Y LOS BIOCOMBUSTIBLES EN MÉXICO

FROM SUGARCANE TO FUEL: THE SCIENCE BEHIND E10 AND BIOFUELS IN MEXICO

Jorge Raúl Cerna-Cortez ^{1*}
Gabriela Esquina Arenas ²
Galo Galeana-Herrera ³

¹Dirección de Innovación y Transferencia del Conocimiento (DITCo), Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.

² Biomovilidad.org, México.

Correos:

jorge.cerna@correo.buap.mx*

gabriela.esquina@correo.buap.mx

ggaleana@biomovilidad.org

Resumen

El combustible E10, una mezcla de 10 % de etanol anhidro con gasolina, se ha propuesto en diversos países (como una opción de transición para disminuir parcialmente las emisiones de gases de efecto invernadero y diversificar la matriz energética). En México, la caña de azúcar y la infraestructura existente en los ingenios ofrecen una base relevante para la producción de bioetanol; sin embargo, su adopción está asociada con retos técnicos, ambientales y de política pública. En este artículo se describe, qué es el E10 y cómo se obtiene el etanol a partir de la caña de azúcar, desde el cultivo y la extracción de jugo hasta la fermentación, destilación, deshidratación y mezcla final con gasolina. Se analizan los beneficios potenciales del E10 —mejora del octanaje, sustitución parcial de carbono fósil, ventajas económicas, ambientales y dinamización del sector cañero — y sus principales limitaciones, entre ellas el posible cambio de uso de suelo y la compatibilidad de materiales en toda la cadena de valor. Finalmente, la BUAP, Biomovilidad.org y el U.S. Grains Council en México se convierten en aliados clave para aportar datos claros y confiables sobre desempeño, emisiones y escenarios reales de uso del E10 en la transición energética del país.

Palabras clave: *etanol; biocombustibles; caña de azúcar; E10; transición energética.*

Abstract

E10 fuel, a blend of 10% anhydrous ethanol with gasoline, has been proposed in several countries as a transitional option to partially reduce greenhouse gas emissions and diversify the energy matrix. In Mexico, sugarcane production and the existing sugar mill infrastructure provide a relevant basis for bioethanol generation; however, its adoption is associated with technical, environmental, and public policy challenges. This article presents what E10 is and how ethanol is obtained from sugarcane, from crop management and juice extraction to fermentation, distillation, and final blending with gasoline. The potential benefits of E10 are discussed—higher octane number, partial substitution of fossil carbon, and increased dynamism in the sugarcane sector—together with key limitations such as possible land-use change, and material compatibility issues along the distribution chain. Finally, BUAP, Biomovilidad.org, and the U.S. Grains Council in Mexico become key partners in providing clear and reliable data on performance, emissions, and realistic E10 use scenarios for the country's energy transition.

Keywords: *ethanol; biofuels; sugarcane; E10; energy transition.*

Introducción

El transporte terrestre depende, en su mayor parte, de combustibles líquidos derivados del petróleo. Cada litro de gasolina que se quema en un motor de encendido por chispa libera dióxido de carbono (CO_2) y otros contaminantes que contribuyen al calentamiento global y al deterioro de la calidad del aire en las ciudades (U.S. Department of Energy, 2024). Frente a este panorama, distintos países han explorado la incorporación de biocombustibles como una estrategia para reducir la dependencia de combustibles fósiles y, simultáneamente, impulsar economías rurales (Asociación para la Movilidad con Biocombustibles en México, 2023; National Renewable Energy Laboratory, 2021).

Entre los biocombustibles líquidos, el etanol carburante ocupa un lugar destacado. Su producción a partir de la caña de azúcar está ampliamente desarrollada en países como Brasil y ha comenzado a discutirse con mayor fuerza en México (Asociación para la Movilidad con Biocombustibles en México, 2024). Una de las formas más sencillas de incorporar etanol al sistema actual de distribución de combustibles es mediante mezclas de baja concentración, como el E10, que pueden utilizarse en la mayoría de los vehículos de gasolina sin modificaciones mayores (Abel et al., 2021; U.S. Grains Council, 2021). El objetivo de este artículo es explicar, de manera clara pero rigurosa, la ciencia que hay detrás del E10 y revisar sus oportunidades y retos en el contexto mexicano, con especial énfasis en el papel que puede desempeñar la comunidad académica y la infraestructura científica de la BUAP, en diálogo con iniciativas especializadas como Biomovilidad.org, enfocadas en la movilidad con biocombustibles en el país (Asociación para la Movilidad con Biocombustibles en México, s. f.).

¿Qué es el E10?

El término **E10** se refiere a una gasolina que contiene 10 % de etanol anhidro en volumen. La mezcla se formula a partir de dos componentes principales: una gasolina base, constituida por

una combinación compleja de hidrocarburos ligeros, **y etanol anhidro ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)**, es decir, etanol combustible cuyo contenido de agua se mantiene **por debajo de 1 % en volumen**, de acuerdo con las especificaciones usuales de etanol carburante (National Renewable Energy Laboratory, 1996, 2021).

Desde el punto de vista de sus propiedades, la incorporación de etanol al combustible tiene varios efectos relevantes. En primer lugar, el etanol posee un número de octano elevado, por lo que su uso mejora la resistencia a la detonación de la mezcla y contribuye a un mejor desempeño del motor cuando el combustible está correctamente formulado (National Renewable Energy Laboratory, 1996). Además, al tratarse de un compuesto oxigenado, favorece bajo ciertas condiciones una combustión más completa, lo que puede contribuir a reducir algunos contaminantes locales. Finalmente, el carbono del etanol proviene del CO_2 atmosférico capturado por la planta durante la fotosíntesis; esto modifica de manera positiva el balance de emisiones a lo largo del ciclo de vida del combustible frente a la gasolina fósil pura (U.S. Department of Energy, 2024; National Renewable Energy Laboratory, 2021).

Como todo combustible, el etanol también presenta características que deben considerarse en el diseño de la cadena de suministro. Su naturaleza polar e higroscópica hace que pueda interactuar de manera distinta con el agua y con ciertos materiales metálicos y poliméricos en tanques, tuberías y sistemas de inyección (National Renewable Energy Laboratory, 1996; Instituto Mexicano del Petróleo, 2018). Sin embargo, la experiencia internacional y estudios de compatibilidad vehicular muestran que, con **especificaciones claras, selección adecuada de materiales y buenas prácticas de operación**, estas cuestiones se gestionan de forma segura: prácticamente toda la flota de gasolina fabricada en los últimos cincuenta años es compatible con E10 y una fracción importante de los vehículos

más recientes tolera incluso mezclas superiores (Abel et al., 2021; U.S. Grains Council, 2021; National Renewable Energy Laboratory, 2021). En otras palabras, **los beneficios energéticos y ambientales del etanol** se pueden aprovechar siempre que se acompañen de normas técnicas y de operación bien diseñadas.

De la caña al etanol: cadena de valor

El camino de la caña al combustible integra etapas agrícolas, biotecnológicas e industriales. Aunque existen múltiples variantes de proceso, se pueden distinguir al menos cuatro pasos fundamentales, ampliamente descritos en la literatura sobre bioetanol a partir de caña (National Renewable Energy Laboratory, 1996):

Producción agrícola de caña. La caña de azúcar es una planta C4 altamente eficiente en la conversión de energía solar en biomasa. En los tallos se acumula una elevada concentración de sacarosa,

principal sustrato para la producción de etanol. Las decisiones agronómicas —variedad, manejo de fertilizantes, uso de residuos, prácticas de riego— condicionan la productividad por hectárea y la huella ambiental del biocombustible (U.S. Department of Energy, 2024).

Extracción de jugo y obtención de azúcares fermentables. En el ingenio azucarero la caña se somete a operaciones de molienda y extracción que permiten obtener un jugo rico en sacarosa. Tradicionalmente esta corriente se destina a la producción de azúcar, pero una fracción puede dirigirse a la elaboración de etanol. También es posible utilizar melazas, subproducto denso y viscoso que aún contiene azúcares fermentables (National Renewable Energy Laboratory, 1996).

Fermentación alcohólica y destilación. En la etapa de fermentación se emplean levaduras, mayoritariamente *Saccharomyces cerevisiae*, que transforman los azúcares en etanol y CO_2 .



Figura 1. Componentes y Propiedades de la Gasolina E10. Fuente: elaboración propia

La eficiencia del proceso depende de la concentración de sustrato, la temperatura, el pH y la tolerancia de las levaduras al alcohol. El caldo fermentado resultante se somete a destilación fraccionada para concentrar el etanol y separar impurezas (National Renewable Energy Laboratory, 1996).

Deshidratación, mezcla y control de calidad. El etanol hidratado debe deshidratarse mediante procesos adicionales (por ejemplo, uso de tamices

moleculares) hasta alcanzar purezas mayores a 99.5 %. El etanol anhidro se almacena y transporta bajo condiciones controladas y se mezcla con la gasolina en instalaciones industriales —como refinерías, terminales de almacenamiento y reparto o puntos de llenado de autotanques— siguiendo especificaciones estrictas de presión de vapor, estabilidad, contenido máximo de agua y límites de contaminantes, definidas por la regulación mexicana aplicable (Comisión Reguladora de Energía, 2018; Instituto Mexicano del Petróleo, 2018).



Figura 2. Etapas en la producción de etanol. Fuente: elaboración propia

Beneficios potenciales del E10 en México

En el debate público, el E10 suele presentarse como un combustible "más limpio". La evidencia disponible sugiere varios beneficios, aunque siempre están matizados por el contexto de implementación.

En primer lugar, se espera una reducción parcial de las emisiones netas de CO₂ en el ciclo de vida, al sustituir una fracción de gasolina por etanol de origen biológico (U.S. Department of Energy, 2024; National Renewable Energy Laboratory, 2021). El impacto final depende de las prácticas agrícolas, la eficiencia del ingenio y la logística de transporte. En segundo lugar, el etanol contribuye a aumentar el octanaje del combustible, lo cual puede permitir formulaciones más estables y con menor necesidad de ciertos aditivos petroquímicos (National Renewable Energy Laboratory, 1996). Finalmente, la producción de etanol carburante abre la posibilidad de diversificar la

cadena de valor de la caña de azúcar, incorporando bioenergía y coproductos de mayor valor agregado, así como esquemas de cogeneración eléctrica (Asociación para la Movilidad con Biocombustibles en México, 2023, 2024).

Panorama internacional, compatibilidad vehicular y experiencias piloto

De acuerdo con la información compilada por Biomovilidad.org y por el U.S. Grains Council, más de 60 países en el mundo utilizan hoy gasolinas mezcladas con bioetanol en concentraciones que superan habitualmente el 5–6 %, con una tendencia clara a incrementar progresivamente el porcentaje de etanol —de mezclas E10 hacia porcentajes incluso superiores— como parte de sus estrategias para mitigar el cambio climático, mejorar la calidad del aire y dinamizar las economías rurales (Asociación para la Movilidad con Biocombustibles en México, 2023, 2024; U.S. Grains Council, 2021).

Retos técnicos, ambientales y de política pública

Los beneficios potenciales del E10 solo se materializan si se afronta una serie de retos que abarcan desde el diseño del proceso hasta la regulación. Entre los desafíos más relevantes se encuentran:

Uso de suelo y competencia con alimentos. El crecimiento de la producción de etanol no debería impulsarse a costa de la deforestación o del desplazamiento de cultivos básicos; este debe impulsarse a partir de la tecnificación y automatización del proceso. El aprovechamiento de melazas y residuos agrícolas puede atenuar este riesgo, pero requiere planificación y marcos de política claros (U.S. Department of Energy, 2024).

Balance energético e hídrico. Para que el E10 contribuya realmente a la transición energética, la energía fósil invertida en fertilizantes, transporte y operación industrial debe ser menor que la energía renovable obtenida. De manera similar, en regiones con estrés hídrico es necesario evaluar con cuidado la disponibilidad de agua para riego y procesos industriales (National Renewable Energy Laboratory, 1996; U.S. Department of Energy, 2024).

Compatibilidad de materiales e infraestructura. La presencia de etanol exige revisar el comportamiento de materiales metálicos y poliméricos en tanques, ductos, bombas y vehículos. Ensayos de laboratorio y pruebas aceleradas de envejecimiento resultan imprescindibles para garantizar la integridad de la infraestructura (Instituto Mexicano del Petróleo, 2018; Comisión Reguladora de Energía, 2018).

Marco regulatorio y trazabilidad

La introducción del E10 requiere normas claras sobre especificaciones de calidad, mezclado, etiquetado en estaciones de servicio y monitoreo de emisiones (Comisión Reguladora de Energía, 2018; European Union, 2018). Sin un marco coherente, los beneficios ambientales pueden diluirse y aumentar la desconfianza social.

El papel de la academia y de la BUAP

Las universidades públicas se encuentran en una posición privilegiada para aportar evidencia científica independiente al debate sobre biocombustibles. En particular, la BUAP, a través de la Dirección de Innovación y Transferencia del Conocimiento (DITCo) y del

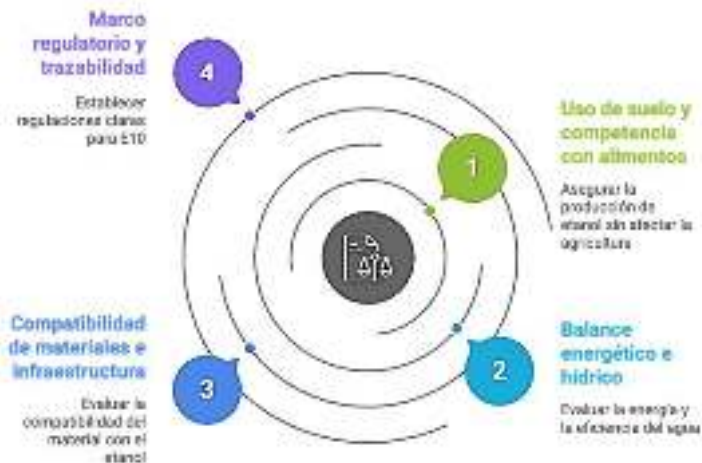


Figura 4. Retos que enfrenta la producción de E10. Fuente: elaboración propia

Laboratorio de Innovación y Materiales Aplicados (LIMA), puede articular proyectos de investigación aplicada que aborden distintos aspectos de la cadena caña-etanol-combustible (National Renewable Energy Laboratory, 1996; U.S. Department of Energy, 2024).

Entre las líneas de trabajo posibles se incluyen la caracterización de propiedades fisicoquímicas de mezclas E10, la evaluación de la interacción del combustible con materiales metálicos y poliméricos, el diseño de pruebas de desempeño y emisiones en colaboración con laboratorios de motores, y el desarrollo de modelos de análisis de ciclo de vida que integren datos agrícolas, Industriales y de uso final (Instituto Mexicano del Petróleo, 2018; Asociación para la Movilidad con Biocombustibles en México, 2023, 2024).

Esta generación de conocimiento no solo tiene valor académico, sino que también sirve como insumo para que autoridades y sector productivo diseñen políticas y estrategias más informadas.

En este contexto, la colaboración con iniciativas especializadas como Biomovilidad.org resulta

clave. Ello aporta una visión complementaria basada en el análisis de política pública, la experiencia en proyectos piloto con mezclas de etanol para el transporte y el diálogo con la industria automotriz y de estaciones de servicio (Asociación para la Movilidad con Biocombustibles en México, s. f., 2024). La articulación entre la evidencia generada en laboratorios universitarios y la experiencia de campo de actores como Biomovilidad.org permite construir una mirada más completa sobre el papel del E10 en la transición energética mexicana.

Más allá del E10: Biocombustibles como plataforma

Aunque este artículo se centra en el E10, la discusión forma parte de un panorama más amplio de biocombustibles avanzados: mezclas con mayor contenido de etanol, etanol de segunda generación a partir de residuos lignocelulósicos, biocombustibles para aviación (SAF) y combinaciones con la electrificación del transporte (U.S. Department of Energy, 2024). El caso del E10 puede verse como una escuela de transición energética: obliga a pensar en cadenas



Figura 5. El papel de los biocombustibles en la transición energética hacia sistemas más sostenibles.

Fuente: elaboración propia

de suministro más complejas, en políticas que articulen agricultura y energía, y en la necesidad de sistemas de medición confiables (Joint Research Centre, 2018; European Union, 2018).

Para México, avanzar en biocombustibles no solo implica adoptar tecnologías importadas, sino también desarrollar soluciones propias, adaptadas a sus condiciones de suelo, clima y estructura industrial (Asociación para la Movilidad con Biocombustibles en México, 2023, 2024). En esa tarea, la ciencia que se realiza en universidades públicas puede marcar la diferencia.

Conclusiones

El E10 representa una de las rutas más inmediatas para incorporar biocombustibles a la matriz energética del transporte sin modificar de manera radical la infraestructura existente. No obstante,

su potencial real depende de cómo se gestionen los aspectos agrícolas, tecnológicos, ambientales y regulatorios a lo largo de toda la cadena caña-etanol-combustible.

Comprender la ciencia que subyace a cada etapa —desde la fotosíntesis en el campo cañero hasta la combustión en el motor— permite superar los discursos simplistas y avanzar hacia una discusión basada en datos y análisis de ciclo de vida. En este escenario, la participación activa de las universidades públicas resulta esencial. Al articular investigación aplicada, formación de recursos humanos y colaboración con los sectores productivo y gubernamental, instituciones como la BUAP pueden contribuir a que el debate sobre el E10 y los biocombustibles en México se traduzca en decisiones energéticas más responsables, técnicamente sólidas y socialmente justas.



Figura 6. Biocombustibles la clave de la transición energética. (Fuente: U.S. Department of Energy, 2024)

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 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

Cobos Ontiveros agradece a la Secretaría de Ciencias Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) antes CONACYT por la beca de Estancia Posdoctoral (CVU 623751). 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

- Abel, R. C., Coney, K., Johnson, C., Thornton, M. J., Zigler, B. T., & McCormick, R. L. (2021). Global ethanol-blended-fuel vehicle compatibility study (NREL/TP-5400-81252). National Renewable Energy Laboratory. <https://doi.org/10.2172/1832216>
- Asociación para la Movilidad con Biocombustibles en México. (2023). Biocombustibles. Biomovilidad.org. <https://biomovilidad.org/biocombustibles/biomovilidad.org>
- Asociación para la Movilidad con Biocombustibles en México. (2024, 26 marzo). El bioetanol debe ser parte de programas de descarbonización del gobierno y de Pemex. Biomovilidad.org. <https://biomovilidad.org/el-bioetanol-debe-ser-parte-de-programas-de-descarbonizacion-del-gobierno-y-de-pemex/biomovilidad.org>
- Asociación para la Movilidad con Biocombustibles en México. (s. f.). Asociación para la Movilidad con Biocombustibles en México. Biomovilidad.org. Recuperado de <https://biomovilidad.org/ambm/biomovilidad.org>
- Comisión Reguladora de Energía. (2018, 3 octubre). La CRE da a conocer estudio realizado por el IMP para uso de gasolinas con etanol en el Valle de México. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/cre/>
- Forbes Staff. (2018, 5 octubre). IMP avala etanol al 10% en gasolinas de la Zona Metropolitana. Forbes México. <https://forbes.com.mx/imp-avala-etanol-al-10-en-gasolinas-de-la-zona-metropolitana/> Forbes México
- Instituto Mexicano del Petróleo. (2018). Evaluación de gasolina E10 en automotores en la Zona Metropolitana del Valle de México [Informe técnico]. Secretaría de Energía / Comisión Reguladora de Energía. Forbes México
- Joint Research Centre. (2018). Renewable Energy – Recast to 2030 (RED II). European Commission. [JRC: EU Science Hub](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/renewable-energy-recast-2030-red-ii_en>JRC: EU Science Hub</p>
<p>European Union. (2018). Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast). Official Journal of the European Union, L 328/82. <a href=)
- National Renewable Energy Laboratory. (1996). Performance of ethanol as a transportation fuel, Chapter 3. En C. E. Wyman (Ed.), Handbook on Bioethanol: Production and Utilization (pp. 37–60). Taylor & Francis. [research-hub.nrel.gov](https://www.nrel.gov)
- National Renewable Energy Laboratory. (2021). Ethanol blends: Providing a renewable fuel choice (NREL/FS-5400-82231). National Renewable Energy Laboratory. <https://www.nrel.gov/publications>
- U.S. Department of Energy. (2024). Biofuel basics. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Bioenergy Technologies Office. <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/biofuel-basics> energy.gov
- U.S. Grains Council. (2021). New study demonstrates ethanol blend compatibility of vehicles around the world. U.S. Grains Council. <https://grains.org/new-study-demonstrates-ethanol-blend-compatibility-of-vehicles-around-the-world/>

Recepción: 12.11.2025

Revisión: 28.12.25

Publicación: 15.01.2026

<https://orcid.org/0009-0003-9934-1103>

<https://orcid.org/0009-0008-7506-4419>

GENERADOR EÓLICO: CUANDO EL VIENTO SE VOLVIÓ ELECTRICIDAD

WIND TURBINE: WHEN WIND TRANSFORMS ELECTRICITY

José Carlos Zepeda Medina^{1,2}

Adriana Hernández Teniza²

¹Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, UPAEP, 21 Sur 1103,
Barrio de Santiago, C.P. 72410, Puebla, Puebla, México

²Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Instituto de Ciencias,
Posgrado en Dispositivos Semiconductores, Av. San Claudio y 14 Sur, Edif.
IC 5 C. U. Col. San Manuel, Puebla 72520, México

Correos:

josecarlos.zepeda@upaep.mx*

adriana.hernandezteni@alumno.buap.mx

Resumen

La contaminación ambiental constituye un problema persistente y de gran relevancia, derivado de las diversas actividades económicas e industriales, entre ellas la generación de electricidad, cuya producción depende en gran medida del uso de combustibles fósiles. En respuesta a esta problemática, se han desarrollado e implementado alternativas orientadas a mitigar el impacto ambiental, promoviendo el uso de tecnologías basadas en fuentes de energía renovable. Estas tecnologías buscan ser sostenibles, eficientes, ampliamente disponibles en la naturaleza y, fundamentalmente, no tóxicas para el entorno. En este contexto, los generadores eólicos representan una opción viable y prometedora, al aprovechar una fuente inagotable de energía: el viento. Cada uno de los componentes que integran estos sistemas está diseñado para optimizar la conversión de la energía cinética del aire en energía eléctrica, alcanzando potencias que varían de aproximadamente 100 W a 12 MW, según el tamaño del generador y las condiciones ambientales de operación, lo que lo convierte en una gran opción de tecnología sostenible y sustentable para el mundo.

Palabras clave: Generador eólico, electricidad, aerogenerador, generador eléctrico, energías renovables.

Abstract

Environmental pollution is a persistent and significant problem resulting from various economic and industrial activities, including electricity generation, which largely relies on fossil fuels. In response to this issue, alternatives have been developed and implemented to mitigate environmental impact, promoting the use of technologies based on renewable energy sources. These technologies aspire to be sustainable, efficient, abundant in nature, and fundamentally non-toxic to the environment. In this context, wind generators are a viable and promising option, as they enable the use of an inexhaustible energy source: wind. Each component of these systems is designed to optimize the conversion of air's kinetic energy into electrical energy, with power ratings ranging from approximately 100 W to 12 MW, depending on generator size and operating conditions. This makes it a strong option for sustainable technologies worldwide.

Keywords: Wind generator, electricity, wind turbine, electric generator, renewable energy.

Introducción

La humanidad, desde sus inicios, ha aprovechado la naturaleza para desarrollar herramientas que le permitan mejorar sus condiciones de vida. Un ejemplo de esto ha sido el aprovechamiento de la fuerza invisible del viento para obtener energía, desde antiguos molinos de viento hasta sofisticados aerogeneradores. Actualmente, cuando la humanidad busca una transición energética, el viento puede convertirse en uno de los aliados más importantes para frenar el cambio climático y reducir cada vez más el uso del combustible fósil para generar energía.

En este artículo se explorará brevemente la tecnología capaz de aprovechar la fuerza del viento para generar electricidad: el generador eólico.

Explicando que es esta tecnología, los tipos de generadores eólicos que existen, así como el panorama de esta tecnología en México y en el mundo. Además, ejemplificar algunas aplica-

ciones innovadoras en el desarrollo y el futuro de esta tecnología.

¿Qué es y cómo funciona un generador eólico?

Un generador eólico (aerogenerador) es el sistema o dispositivo que transforma la energía del viento en energía eléctrica. Un aerogenerador funciona de la siguiente manera: el aire que circula a través del interior hace girar las palas del aerogenerador. Estas palas o hélices están unidas a un rotor. El movimiento de rotación del rotor se convierte en energía eléctrica mediante un generador eléctrico.

Un aerogenerador es un dispositivo tecnológico muy complejo; sin embargo, podemos resumir sus componentes en 4 partes principales (palas, rotor, generador eléctrico y control), los cuales se describen a continuación:

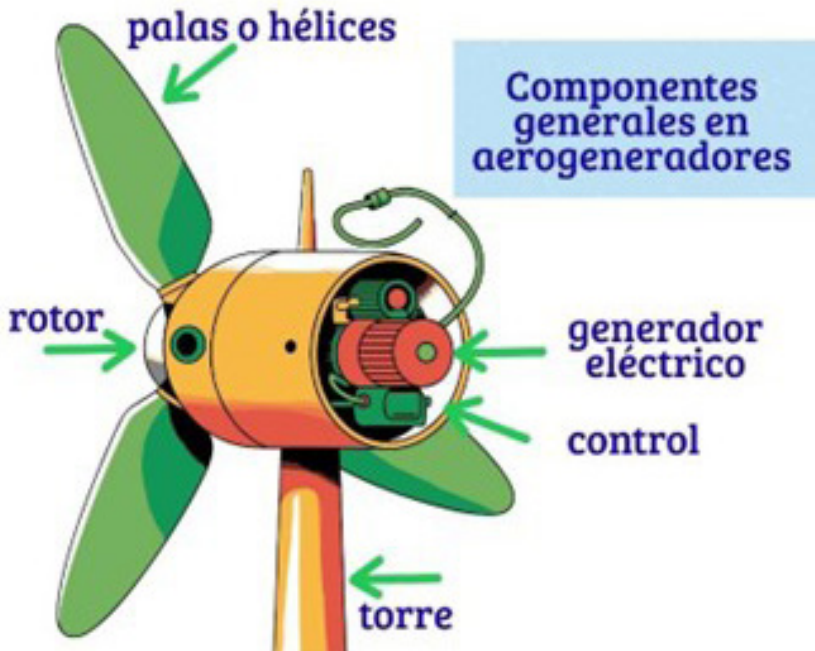


Figura No. 1. Componentes principales de un generador eólico. Imagen realizada usando IA.

- Palas o hélices: su función es “atrapar” el aire; esto es posible debido a la forma o geometría de estas palas, haciendo que el aire las empuje, generando un movimiento rotatorio.
- Rotor/eje: su función es transmitir el movimiento rotatorio generado por las palas al generador eléctrico. Las palas y el rotor, en esencia, son un rehilete.
- Generador eléctrico: convierte el movimiento transmitido en corriente eléctrica, aprovechando generalmente el campo magnético de los imanes presentes en este componente, los cuales, a través de la inducción electromagnética, producen corriente eléctrica (Romero, 2019; Tipler, 2008).
- Control: es un sistema electrónico que evita que el rotor se salga de control.

Según la orientación de su eje:

1. Eje horizontal: dentro del mundo de los generadores eólicos, este tipo es el más común en parques eólicos (extensión de varios kilómetros que alberga decenas de aerogeneradores); generalmente está compuesto por tres palas o hélices. Sin embargo, dentro de esta categoría también tenemos subcategorías (Sanz, 2022):

- Multipala: son aerogeneradores con más de 3 palas o hélices; visualmente, son muy similares a los molinos de agua. Estos se usan principalmente en tareas de aplicación rural, como el bombeo de agua de pozos.
- De velocidad fija: estos aerogeneradores están diseñados para que siempre roten a la misma velocidad; sin embargo, su eficiencia puede ser menor.
- De velocidad variable: estos aerogeneradores están diseñados para que su velocidad de rotación esté en función de la velocidad del viento, es decir, a mayor viento, más rendimiento.

Tipos de generadores eólicos

Podemos clasificar los aerogeneradores en 3 categorías principales: orientación del eje, tamaño o capacidad y ubicación.



Figura No.2. Tipos de aerogeneradores de eje horizontal. Imagen realizada usando IA.

2. Eje vertical: Este tipo de aerogeneradores, como lo indica su nombre, su rotor o eje está colocado de forma vertical, son menos comunes que los de eje horizontal, pero encuentran mayor uso en ciudades o zonas donde el viento tiende a cambiar bastante. También existen subcategorías, las cuales son (Zepeda, 2017):

- Savonius: su diseño incluye palas o hélices semicilíndricas. Su diseño destaca por ser de bajo costo y sencillo, pero su eficiencia es menor. Generalmente, se usan en aplicaciones pequeñas de generación eléctrica.
- Darrieus: La forma de sus palas asemejan una C o también rectas en forma de H. Su diseño permite que sean más eficientes que otros aerogeneradores verticales, sin embargo, necesitan un impulso inicial externo para iniciar su funcionamiento.
- Giromill: Es una variante del tipo Darrieus, caracterizada por que sus palas son rectas.

Según su tamaño o capacidad (GWEC, 2023):

1. Pequeños: aerogeneradores con capacidad de generar entre 100 W y pocos kW, usados principalmente para alimentar pequeñas casas o cabañas aisladas, granjas, invernaderos, etc.
2. Medianos: Estos aerogeneradores tienen capacidad de generar de decenas a cientos de kW; con esta capacidad pueden generar la electricidad para producir una población pequeña.
3. Grandes: su capacidad se mide en MW y pueden generar suficiente electricidad para alimentar ciudades. Actualmente, existen prototipos capaces de generar 12 MW, cuyas palas llegan a superar los 100 m.

Según su ubicación (GWEC, 2023):

1. En tierra (*onshore*): Se catalogan así, cuando están ubicados o instalados en llanuras, desiertos, montañas, etc.
2. En el mar (*offshore*): Se encuentran instalados en el mar, donde los vientos son más constantes.

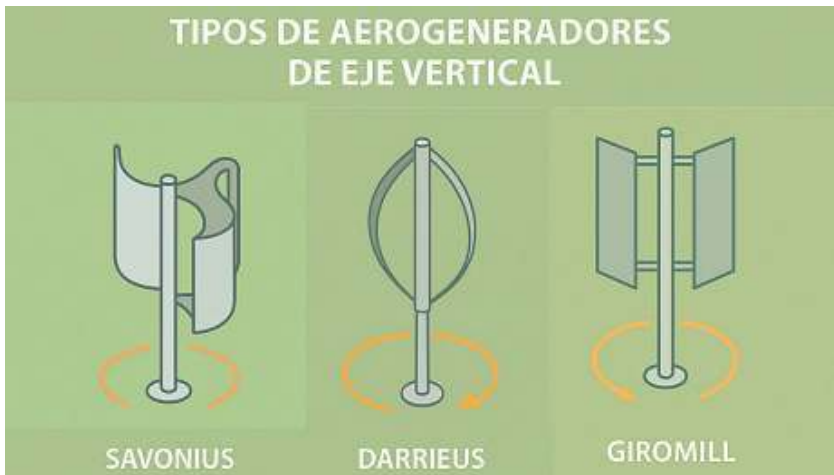


Figura No.3. Tipos de aerogeneradores de eje vertical. Imagen realizada usando IA.

¿Por qué el viento hace girar las palas de un aerogenerador?

Lo que impulsa o hace girar las palas de un aerogenerador cuando el viento incide sobre ellas es la aerodinámica, sí, la misma ciencia que hace volar a los aviones. La explicación no es tan simple como decir que el viento empuja a las palas y por eso rotan. La razón del movimiento rotatorio de las hélices se basa en el perfil o forma de las palas, las cuales son cuidadosamente diseñadas para aprovechar la diferencia de presiones que se produce cuando el aire o viento incide sobre la superficie de estas.

El aire se mueve como un flujo y, cuando circula o se desliza sobre una pala, su velocidad es

mayor en la parte superior que en la inferior. Aquí entra en juego el principio de Bernoulli (Anderson, 2010), el cual nos dice que al tener una mayor velocidad de flujo en la parte superior de la pala genera que la presión en esa zona sea menor, generando así una fuerza de sustentación (lift) que impulsa el giro de las palas. En general, este principio es el que se aplica en el impulso de los aviones hacia arriba y en el empuje lateral en el caso de los aerogeneradores. Este fenómeno físico se le conoce como efecto aerodinámico y es la columna vertebral de la tecnología de los aerogeneradores.

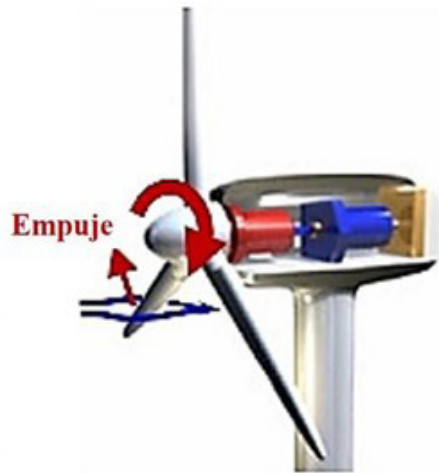
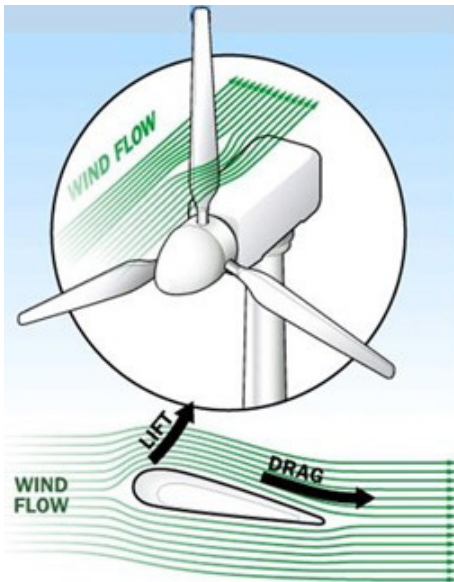


Figura No. 4. Figura esquemática del flujo del viento deslizándose en una pala, generando sobre la misma dos fuerzas: de empuje (lift) y de arrastre (drag). <https://unpocodecienciaporfavor.com/2018/06/01/Las-claves-del-funcionamiento-de-una-turbina-eolica/>

En el caso de los aerogeneradores de eje horizontal, las palas se diseñan y se colocan de una manera específica, de tal manera que se pueda mantener un ángulo de ataque determinado respecto al viento. El ángulo de ataque es un

parámetro muy importante que determina el grado de sustentación y arrastre que se genera en una pala, determinando la capacidad de giro del rotor y, por ende, cuánta energía se extrae del viento (Zepeda, 2017).

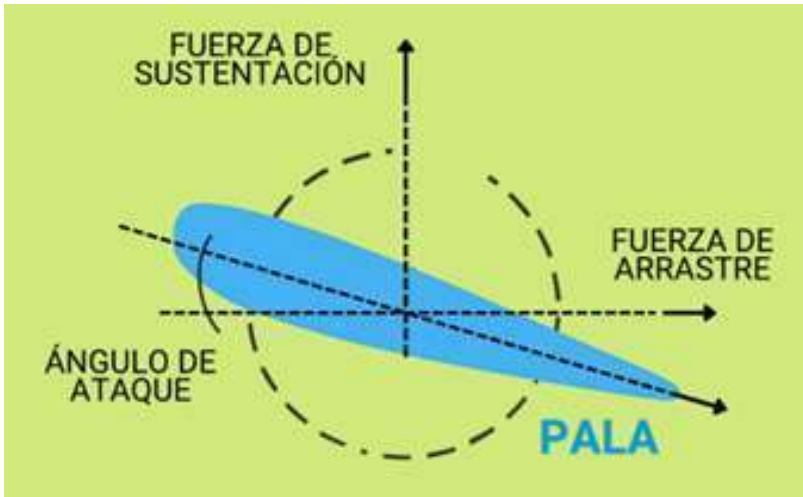


Figura No. 5 Parámetros que influyen en el movimiento de una pala generado por el viento. Elaboración propia.

En otras palabras, el ángulo de ataque es el grado de inclinación con el que el viento impacta o se desplaza sobre la pala. Si este ángulo es muy pequeño o nulo, la pala no girará; si es muy grande, el flujo de aire se separa, lo que genera turbulencia. En palabras simples, el ángulo de ataque determina la eficiencia

de empuje de la pala. Por esta razón, los sistemas modernos de control en aerogeneradores ajustan constantemente el ángulo de ataque de las palas, lo que optimiza la generación de energía en vientos muy variables; a este sistema de control se le conoce como pitch control (Burton et al., 2021).

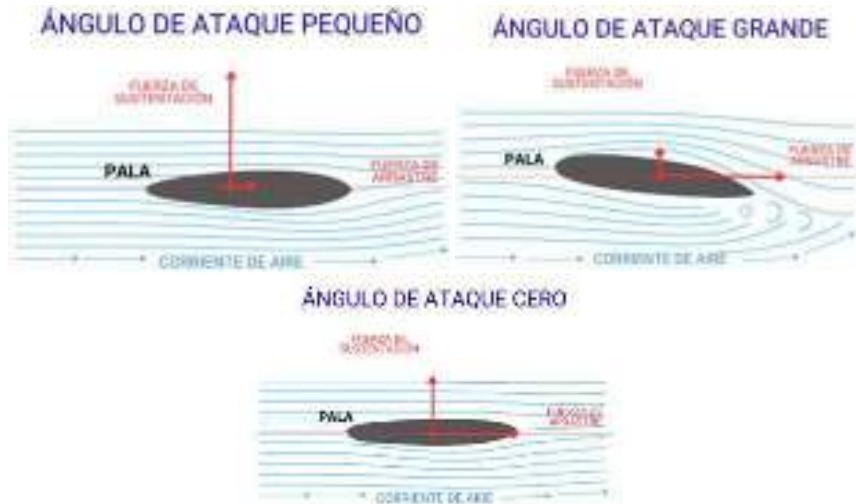


Figura No. 6. Ángulo de ataque en aerogeneradores. Elaboración propia.

Otro aspecto importante en la aerodinámica de las palas es la velocidad del rotor en la punta de cada pala. A medida que las palas se hacen cada vez más grandes, el radio del rotor incrementa, por consiguiente, la punta de las palas puede alcanzar velocidades de hasta 300 km/h, esto genera contaminación sonora debido al ruido producido, además, a esas velocidades, la estructura y componentes del aerogenerador se ven comprometidas (Manwell, McGowan & Rogers, 2011).

En cuanto a los aerogeneradores de eje vertical, dependiendo del diseño, el funcionamiento de sus palas puede basarse en la combinación de dos principios aerodinámicos: la fuerza de sustentación, o lift, que ya describimos anteriormente, y la fuerza de arrastre, o drag.

- En el aerogenerador tipo Savonius, se aprovecha la fuerza de arrastre, ya que, como se describió anteriormente, este tipo tiene palas semicilíndricas, lo que permite que el viento las empuje directamente, como una especie de vela de barco. La simplicidad de su diseño los hace ideales para medios urbanos; sin embargo, su eficiencia ronda el 15% del viento disponible, lo que los hace poco eficientes (Paraschivoiu, 2002; Da Silva, R.R., 2012).
- El aerogenerador tipo Darrieus tiene palas curvas y de perfil delgado, lo que

implica que su funcionamiento se basa en el principio de sustentación, tal como en los aerogeneradores horizontales. Estos aerogeneradores, debido a su diseño de palas, se caracterizan por ser silenciosos y por alcanzar eficiencias de hasta un 40% (Le Gourieres, 1982).

- En los de tipo Giromill, debido a sus palas rectas, su funcionamiento combina los principios de sustentación y arrastre, lo que permite un rendimiento estable en condiciones de viento variable o incluso turbulento (Tjiu et al., 2015).

Actualmente, los principales esfuerzos de investigación y desarrollo de generadores eólicos se enfocan en optimizar las propiedades estructurales y la geometría de las palas, usando herramientas de simulación computacional de fluidos (CFD por sus siglas en inglés). Estas herramientas, por ejemplo, permiten simular y analizar el flujo de aire para minimizar los efectos de la turbulencia y así lograr un mejor rendimiento (Tummala et al., 2016; Islam, Mekhilef & Saidur, 2013).

Panorama de los generadores eólicos

Actualmente, países en todo el mundo están realizando esfuerzos para que la energía eléctrica producida sea a través de energías renovables, en este caso, producidas a través de campos eólicos, en México por ejemplo, cuyas



Figura No. 7. Parque eólico, Oaxaca, México. <https://www.elorienten.net/home/2012/10/31/inauguran-centrales-eolicas-la-venta-iii-y-oaxaca-i/>

condiciones geográficas son ideales para esta tecnología, tiene varios campos eólicos, siendo que Oaxaca concentra cerca del 60% de la capacidad instalada, otros estados como Tamaulipas, Baja California y Puebla, por mencionar algunos (AMDEE, 2024), también han estado sumando esfuerzos para incrementar su capacidad.

En el caso de Latinoamérica, destaca el país de Chile, sobre todo en la Patagonia, que es una de las zonas con mayor potencial eólico del mundo. Otro país que también ha apostado fuerte es Brasil, que ha implementado grandes parques eólicos costeros (GWEC, 2023).

Y a nivel mundial, los países líderes en esta tecnología son China, Estados Unidos y Alemania, donde son pioneros en la instalación de generadores eólicos en la modalidad offshore y turbinas capaces de generar 12 MW (Sanz, 2022).

Ejemplos de desarrollo y aplicación

- **En carreteras**

Se han realizado proyectos experimentales en los que se han colocado pequeños aerogeneradores (sobre todo de eje vertical) en las orillas de las

autopistas, avenidas o ejes con gran afluencia vehicular, para aprovechar el aire generado por el tránsito de los vehículos.

La electricidad producida por estos pequeños aerogeneradores alimenta el alumbrado público o podría destinarse a estaciones de recarga de autos eléctricos (RD-ICUAP, 2024).

- **En el mar**

El uso de la modalidad offshore ha aumentado debido a las condiciones del viento en el mar, que son más constantes y presentan menos obstáculos naturales o artificiales (montañas, edificios, etc.). Sin embargo, este tipo de aerogeneradores requiere una mayor inversión en infraestructura (GWEC, 2023).

- **Uso de simulaciones para desarrollo de prototipos**

El empleo de simulaciones permite a los ingenieros y científicos construir modelos y prototipos para predecir su comportamiento, ahorrando así costos de experimentación. En estas simulaciones, como se mencionó anteriormente, se puede analizar y optimizar el diseño de las palas



Figura No. 7. Parque eólico, Oaxaca, México. <https://www.eloriente.net/home/2012/10/31/inauguran-centrales-eolicas-la-venta-iii-y-oaxaca-i/>

para mejorar su respuesta al viento; también se pueden diseñar rotores con una mejor configuración de engranajes que permitan incrementar la velocidad de rotación de las palas. Estas simulaciones pueden llevarse a cabo mediante software especializado o incluso mediante software de cálculo técnico como Matlab (Zepeda, 2017). El análisis a través de simulaciones es clave para poder diseñar prototipos más eficientes y seguros.

El futuro de los generadores eólicos

La energía eólica, como otras energías renovables, enfrenta retos que debe resolver antes de que se convierta en una alternativa completamente viable para sustituir a las energías fósiles; tales retos son, por ejemplo, la intermitencia del viento, el uso y el reciclaje de las palas, así como la afectación ambiental y visual debido a los campos eólicos. Sin embargo, a estos retos también surgen posibles soluciones:

- Aerogeneradores con mayor eficiencia (más altos o con mejor diseño de palas, etc.).
- Palas fabricadas con materiales sostenibles y que puedan presentar buenas características mecánicas

- Combinación o integración con otras energías renovables, como las celdas solares.
- Integración de aerogeneradores en edificios, puentes, carreteras, etc.

Así como en las tecnologías de celdas solares, el futuro de los generadores eólicos parece apuntar a una integración cotidiana, y no solo en grandes parques eólicos.

Conclusión

El desarrollo de generadores eólicos evidencia el potencial de la energía del viento como alternativa sustentable frente a las fuentes convencionales de electricidad. Su capacidad de adaptación a distintas escalas de potencia y su bajo impacto ambiental consolidan su relevancia en la transición hacia sistemas energéticos más limpios y sostenibles. La fuerza “invisible” del viento ha estado presente en el desarrollo de las civilizaciones, desde mover barcos en el mar, molinos en las comunidades, hasta alimentar de electricidad a ciudades enteras. La humanidad tiene la oportunidad científica y tecnológica de seguir aprovechando cada vez más esta fuerza mediante generadores eólicos para avanzar hacia un futuro limpio y sustentable.



Figura No. 9. Perspectiva futurista de la integración de la energía eólica a las grandes ciudades. Imagen realizada usando IA.

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 experimento, pueden compartirse 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

Agradecemos a la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla (*UPAEP*) por el apoyo otorgado al Dr. José Carlos Zepeda Medina y a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (*SECIHTI*) por el apoyo otorgado a CVU-100841.

Referencias

- Anderson, J.D., Jr. (2010). *Fundamentals of Aerodynamics* (5a. ed). McGraw Hill. https://ia800808.us.archive.org/22/items/FundamentalsOfAerodynamics5thEdition/Fundamentals_of_Aerodynamics_5th_edition.pdf
- Asociación Mexicana de Energía Eólica. (2024). Informe anual de energía eólica en México. <https://www.amdee.org>
- Burton, T. L., Jenkins, N., Sharpe, D., Bossanyi, E. and Graham, M. (2021). *Wind Energy Handbook* (3a. ed.). John Wiley and sons.
- Da Silva, R. R. (2012). Integral analysis of rotors of a wind generator. *Renewable and sustainable energy reviews*, 16(8), 6128-6138. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.070>
- Global Wind Energy Council (2023). *Global Wind Report 2023*. <https://gwec.net/global-wind-report-2023/>
- Hernández, E. y Alvarado J.J. (2024). Energía eólica impulsada por tráfico vehicular, una opción para el consumo de energía eléctrica por alumbrado público. RD-ICUAP, 10(Número Especial Posgrado ICUAP), 122-132. <https://doi.org/10.32399/icuap.rdic.2448-5829.2024.29.1345>
- Islam, M.R., Mekhilef, S. and Saidur, R. (2013). Progress and recent trends of wind energy technology. *Renewable and sustainable energy reviews*, 21, 456-468. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.007>
- Le Gourieres, D. (1982). *Wind Power Plants: Theory and Desing*. Pergamon Press.
- Manwell, J.F., McGowan, J. G. and Rogers, A.L. (2011). *Wind Energy Explained: Theory, Desing and Application*(2a. ed.). Wiley.
- Paraschivoui, I. (2002). *Wind Turbine Desing: With Emphasis on Darrieus Concept*. Polytechnic International Press. <https://books.google.com.mx/>
- Tipler, P.A. and Mosca, G. (2008). *Physics for Scientists and Engineers* (6a. ed.). Freeman and company.
- Tijju, W. Marnoto, T., Mat, S., Ruslan, M.H., and Sopian, K. (2015). Darrieus Vertical axis wind turbine for power generation I: Assessment of Darrieus VAWT configurations. *Renewable Energy*, 75, 50-67. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.09.038>
- Tummala, A., Velamati, R. K., Sinha. D.K., Indraj, V. and Krishna, V. H. (2016). A review on small scale wind turbines. *Renewable and sustainable energy reviews*, 56, 1351-1371. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.027>
- Zepeda, J.C. (2017). *Modelo en Simulink de un generador eólicos de imanes permanentes* [Tesis de maestría no publicada]. Instituto Tecnológico de Puebla

Recepción: 21.11.2025

Revisión: 15.12.2025

Publicación 15.01.2026

<https://orcid.org/0009-0007-4012-1631>

<https://orcid.org/0000-0002-2119-2254>

<https://orcid.org/0000-0001-8649-7748>

<https://orcid.org/0000-0001-6248-0562>

<https://orcid.org/0000-0003-3976-3550>

<https://orcid.org/0000-0003-2613-3453>

BRUGMANSIA ARBOREA (FLORIPONDIO): REVISIÓN ETNOFARMACOLÓGICA Y ANÁLISIS DE INVESTIGACIONES BIOMÉDICAS RECIENTES

BRUGMANSIA ARBOREA (FLORIPONDIO): AN ETHNOPHARMACOLOGICAL REVIEW AND ANALYSIS OF RECENT BIOMEDICAL RESEARCH

Saúl Arturo Ríos Cano¹

Alberto Ramírez-Mata²

Mónica Araceli Olea Amezcua³

Laura Guadalupe Hernández Aragón⁴

Alejandra Escobar Noriega⁵

Claudia Mancilla Simbro^{6*}

¹Facultad de Medicina,

Complejo Nororiental Campus Teziutlán. Teziutlán, Puebla, México

²Lab. Interacción bacteria-planta - Centro de Investigaciones
en Ciencias Microbiológicas. Instituto de Ciencias (ICUAP).

Prolongación de la 24 Sur y avenida San Claudio S/N, Colonia San
Manuel, Puebla, Pue. México, C.P. 72570

³Facultad de Artes Plásticas y Audiovisuales,
Vía Atlixcáyotl No. 2499 Complejo Cultural Universitario Reserva
Territorial Atlixcáyotl, 72810, Puebla, Pue. México

⁴Laboratorio de Simulaciones Moleculares Computacionales,
Facultad de Ciencias Químicas, BUAP, 72570, Puebla México
⁵Facultad de Medicina- Academia de Fisiología.
Calle 13 Sur 2706, Puebla, Pue. México. 72410.

⁶*HybridLab. Fisiología y Biología Molecular de Células Excitables -
Instituto de Fisiología. C.P. 72570
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, Pue. México

Correos:

saul.rioscano@correo.buap.mx

alberto.ramirez@correo.buap.mx

monica.olea@correo.buap.mx

laura.hdzaragon@correo.buap.mx

alejandrad.escobar@correo.buap.mx

Autor de correspondencia: [claudia.](mailto:claudia.mancilla@correo.buap.mx)

[mancilla@correo.buap.mx*](mailto:mancilla@correo.buap.mx)

Resumen

Brugmansia arborea (L.) Lagerheim, comúnmente conocida como Floripondio, es una planta con una rica historia de uso etnobotánico, especialmente en la región andina, con fines rituales, y en México, por sus propiedades antiinflamatorias. Esta revisión sintetiza el conocimiento científico actual de la planta, integrando sus aplicaciones tradicionales con la investigación biomédica moderna. Los estudios farmacognósticos han identificado alcaloides tropanos, específicamente atropina, apoatropina y 3 α -tigloil-oxitropano, como sus principales compuestos bioactivos, que ejercen efectos significativos sobre el sistema nervioso central (SNC). Investigaciones farmacológicas recientes en modelos animales han demostrado que un extracto de metanol de *B. arborea* puede atenuar la expresión de tolerancia a la morfina, un mecanismo terapéutico importante para revertir la tolerancia establecida, pero no su adquisición. Cabe destacar que este efecto no fue replicado por los alcaloides puros aislados, lo que sugiere que otros compuestos no identificados o interacciones sinérgicas dentro del extracto son responsables. Paralelamente, investigaciones biotecnológicas inspiradas en su uso tradicional contra la artritis reumatoide han establecido con éxito cultivos de callos *in vitro* para la producción sostenible de sus metabolitos secundarios. Estas líneas de investigación paralelas validan diferentes facetas del legado etnobotánico de la planta y destacan su potencial como fuente de nuevos agentes terapéuticos tanto para trastornos del SNC, como el manejo de la dependencia de opioides, como para enfermedades inflamatorias.

Palabras clave: Extracto, propiedades antiinflamatorias, daño al SNC, biotecnología, alcaloides

Abstract

Brugmansia arborea (L.) Lagerheim, commonly known as Floripondio, is a plant with a rich history of ethnobotanical use, particularly in the Andean region for ritual purposes and in Mexico for its anti-inflammatory properties. This review synthesizes the current scientific understanding of the plant, bridging its traditional applications with modern biomedical research. Pharmacognostic studies have identified tropane alkaloids, specifically atropine, apoatropine, and 3 α -tigloyl-oxitropane, as the principal bioactive compounds, which exert significant effects on the central nervous system (CNS). Recent pharmacological investigations in animal models have demonstrated that a methanol extract of *B. arborea* can attenuate morphine tolerance, a therapeutically important mechanism for reversing established tolerance, but not its acquisition. Notably, this effect was not replicated by the isolated pure alkaloids, suggesting that other unidentified compounds or synergistic interactions within the extract are responsible. Concurrently, biotechnological research inspired by its traditional use against rheumatoid arthritis has successfully established *in vitro* callus cultures for the sustainable production of its secondary metabolites. These parallel research streams validate different facets of the plant's ethnobotanical legacy and highlight its potential as a source of novel therapeutic agents for both CNS disorders, such as opioid dependence management, and inflammatory diseases.

Keywords: Extract, Anti-inflammatory properties, CNS disorders, Biotechnology, alkaloids.

Introducción

Brugmansia arbórea (L.) Lagerheim, miembro de la familia de las solanáceas, popularmente conocida como Floripondio, es una planta de gran interés etnofarmacológico (Fig.1). Con una larga y documentada historia de uso en la medicina tradicional en todo el continente americano, recientemente ha captado la atención de la comunidad investigadora biomédica por sus posibles aplicaciones terapéuticas. Los profundos efectos fisiológicos de la planta, arraigados en su composición química única, la han convertido en objeto de veneración tanto en rituales culturales como en investigación científica en los laboratorios modernos. Este artículo pretende sintetizar el conocimiento actual sobre *B. arborea*, integrando su trasfondo etnobotánico, la farmacognosia y los hallazgos de investigaciones científicas recientes. Al examinar sus aplicaciones tradicionales como guía para la investigación contemporánea, podemos comprender mejor su potencial terapéutico. Esta revisión culminará con un análisis de las perspectivas futuras para su aplicación en el descubrimiento y desarrollo de fármacos, comenzando con una exploración de su papel fundamental en la medicina tradicional.



Figura 1. *Brugmansia arbórea* (L.). Fotografía tomada por Saul A. Rios Cano y Claudia Mancilla Simbro, Puebla Pue. México, Diciembre de 2025.

Contexto etnobotánico y uso medicinal tradicional

El estudio de la etnobotánica proporciona un marco fundamental para la investigación farmacológica moderna, ofreciendo valiosos conocimientos derivados de siglos de interacción entre humanos y plantas. Para una planta con una bioactividad tan potente como *B. arbórea*. Comprender sus aplicaciones tradicionales no sólo reviste interés histórico; proporciona una guía esencial para la investigación científica específica sobre sus componentes químicos y sus mecanismos de acción. El conocimiento tradicional ayuda a los investigadores a formular hipótesis y validar la eficacia potencial de los productos naturales, conectando la sabiduría ancestral con la medicina basada en la evidencia (Fig.2).



Figura 2. *Brugmansia arbórea* (L.), fotografía tomada por Saul A. Rios Cano y Dra. Claudia Mancilla Simbro, en La Facultad de Medicina, Complejo Nororiental Campus Teziutlán, Teziutlán, Puebla, México, Diciembre de 2025.

Uso global: Perspectivas desde la región andina

La historia etnobotánica de la *Brugmansia*, el género de esta planta, está profundamente arraigada en las prácticas culturales y espirituales de Sudamérica. La investigación ha documentado su papel a lo largo y ancho de la

medicina tradicional andina, particularmente en el norte de Perú. En esta región la *Brugmansia* y otras especies han sido parte integral de prácticas rituales, donde sus potentes propiedades psicoactivas, también, se utilizan en un contexto ceremonial estructurado (De Feo, 2004). Este uso resalta los importantes efectos de la planta sobre el sistema nervioso central, un área clave de interés para la farmacología moderna.

Uso en México: Enfoque en el Valle de México

En México, la aplicación tradicional de *B. arborea* ha sido bien documentada, particularmente por sus propiedades antiinflamatorias. Un estudio reciente identificó *B. arborea* como la especie medicinal más consumida en el Valle de México para aliviar los síntomas asociados con la artritis reumatoide (Pérez González et al., 2022). Este uso específico y localizado contra una enfermedad inflamatoria crónica proporciona una poderosa directriz etnofarmacológica para la investigación moderna, que exige una investigación específica del perfil químico de la planta para aislar las moléculas responsables de esta actividad antiinflamatoria.

Farmacognosia: Principales compuestos activos

La farmacognosia es la rama de la ciencia que se ocupa de los medicamentos obtenidos de plantas u otras fuentes naturales. Su función principal en la investigación de productos naturales es aislar e identificar las moléculas bioactivas responsables de los efectos fisiológicos y terapéuticos observados en una planta. En el caso de *B. arborea*. El análisis farmacognóstico ha sido crucial para dilucidar la base química de su potente

actividad. Esta sección detalla los componentes químicos clave que se han aislado de la planta.

Un estudio orientado al bioensayo de un extracto de metanol de *B. arborea* confirmó que la clase primaria de compuestos característicos del género *Brugmansia* son alcaloides tropánicos. Esta investigación condujo al aislamiento e identificación exitosos de tres alcaloides tropánicos específicos de la planta (Capasso et al., 1997) (Fig 3):

La presencia de estos alcaloides anticolinérgicos proporciona una clara explicación farmacológica de los potentes efectos de la planta sobre el sistema nervioso central (SNC). Este perfil químico sustenta su uso en rituales tradicionales y su potencial para aplicaciones terapéuticas modernas dirigidas a las vías del SNC, un tema explorado en investigaciones biomédicas recientes.

Investigaciones biomédicas y potencial terapéutico

La investigación científica moderna sobre plantas medicinales sirve para validar el conocimiento tradicional, dilucidar los mecanismos de acción subyacentes y explorar nuevas aplicaciones terapéuticas. Mediante la aplicación de métodos experimentales rigurosos, los investigadores pueden transformar las pistas etnobotánicas en candidatos terapéuticos basados en la evidencia. Esta sección revisa dos líneas de investigación distintas y recientes sobre el potencial terapéutico de *B. arborea*, cada una de las cuales refleja un aspecto diferente de su uso tradicional: sus efectos sobre la dependencia de opioides y su potencial para producir compuestos antiinflamatorios a través de métodos biotecnológicos.



Figura 3. Principales componentes de *B. arborea*, DrugBank (Wishart DS, 2004). <https://chem.echa.europa.eu/100.007.188/overviewviva> en 2024 (Secretaría de Salud, 2025).

Investigación sobre los efectos sobre la tolerancia y la dependencia de los opioides

Basándose en la actividad conocida de la planta sobre el SNC, investigaciones recientes han explorado su potencial para modular la tolerancia y la dependencia de los opioides, un importante problema de salud pública.

- 1. Fondo:** la justificación de esta investigación fue respaldada por hallazgos previos *in vitro*. Los ensayos de unión ya habían demostrado que los extractos de metanol y agua de *B. arborea* mostraron afinidad por diversos receptores del SNC implicados en fenómenos de dependencia, incluidos los receptores de serotonina (5-HT_{1A}, 5-HT_{2A}, 5-HT_{2C}), dopaminérgicos (D₁, D₂) y adrenérgicos (α ₁, α ₂) (Nencini et al., 2006). Además, un estudio anterior *in vitro*. Un estudio demostró que los alcaloides de la planta podrían reducir los síntomas de abstinencia de morfina (Capasso y De Feo, 2003).
- 2. Objetivo del estudio:** investigar la actividad de un extracto de metanol de *B. arborea* (BRU), así como sus compuestos aislados, tanto en la adquisición como en la expresión de tolerancia y dependencia a la morfina en ratones.
- 3. Resultados clave sobre la tolerancia a la morfina:** El estudio encontró que la administración aguda del extracto de BRU en una dosis alta (30 mg/kg) disminuyó significativamente la *expresión* de tolerancia a la morfina, lo que significa que ayudó a restaurar el efecto analgésico de la morfina en ratones tolerantes. Sin embargo, el extracto no atenuó la *adquisición* de tolerancia cuando se administra simultáneamente con morfina durante varios días.
- 4. Resultados clave sobre la dependencia de la morfina:** En el estudio, la administración repetida de morfina indujo con éxito dependencia física en ratones. Esta dependencia se evaluó tras una prueba de

provocación con el antagonista opioide naloxona, lo que provocó un conjunto característico de síntomas de abstinencia somática. La administración del extracto de *B. arborea* demostró reducir significativamente estos síntomas de abstinencia, que incluían saltos, encabritamiento, temblor de las patas delanteras y castañeteo de dientes, demostrando así un efecto atenuante sobre la expresión de la dependencia a la morfina.

- 5. Papel de los alcaloides puros:** curiosamente, cuando los alcaloides aislados puros (atropina, apoatropina y 3 α -tigloil-oxitropano) se administraron solos, no produjeron un efecto significativo sobre los síntomas de abstinencia en comparación con el grupo control. Esto sugiere que el efecto del extracto completo podría deberse a interacciones sinérgicas entre múltiples compuestos o a la presencia de otras moléculas activas aún no identificadas.

Enfoques biotecnológicos para la producción de compuestos antiinflamatorios

Una investigación pionera ha conectado el uso tradicional de *B. arborea* como agente antiinflamatorio con biotecnología vegetal moderna, con el objetivo de crear una fuente sostenible de sus valiosos metabolitos secundarios.

- 1. Razón fundamental:** motivados directamente por la aplicación tradicional de la planta en el Valle de México para tratar los síntomas de la artritis reumatoide, los investigadores buscaron establecer un sistema de cultivo *in vitro*. El objetivo era desarrollar un método confiable y sostenible para producir los metabolitos secundarios de la planta, evitando las variables agrícolas y ambientales (Pérez González et al., 2022; Hernández-Amasiñen et al., 2021).
- 2. Metodología:** el estudio empleó una técnica de cultivo de tejido vegetal uti-

lizando extractos de hojas de *B. arborea*. La formación de callos (callogénesis) se indujo cultivando los extractos en medios que contenían diversas concentraciones de citocinina (cinetina - KIN) y una auxina (ácido 1-naftalenacético - ANA), que son reguladores del crecimiento de las plantas.

- 3. Resultado primario:** los investigadores informaron que la callogénesis se indujo con éxito en todas las concentraciones analizadas de reguladores de crecimiento. Con base en la morfología y las tasas de inducción, se seleccionó la concentración de 2,5 mg/L de KIN y 1 mg/L de ANA como la línea celular más prometedora para continuar el estudio (Pérez González et al., 2022).

Estos hallazgos combinados de distintos campos de investigación demuestran el potencial multifacético de *B. arborea*, abriendo el camino para una discusión más profunda sobre su futuro en la medicina (Pérez-González, 2025).

La investigación científica de *B. arborea*. Proporciona un ejemplo convincente de cómo la etnofarmacología puede guiar el descubrimiento de fármacos modernos. Esta revisión sintetiza hallazgos que vinculan las funciones tradicionales de la planta con sus actividades biológicas científicamente validadas, abriendo prometedoras vías para el desarrollo terapéutico futuro.

Síntesis de los hallazgos

La evidencia presentada confirma que *B. arborea* es una planta con una bioactividad significativa, respaldada tanto por una historia de uso etnobotánico como por un riguroso análisis científico. Sus aplicaciones tradicionales —el uso ritual en los Andes, que apunta a efectos sobre el SNC, y su consumo en México para afecciones inflamatorias como la artritis reumatoide, están respaldadas por la investigación actual. La identificación de alcaloides tropánicos, como la atropina, proporciona una base química

clara para su actividad sobre el SNC. Estudios recientes han validado aún más estas pistas tradicionales, demostrando que el extracto de la planta puede modular las vías de dependencia de opioides y que sus células pueden cultivarse para producir potencialmente compuestos antiinflamatorios. Un hallazgo crucial del estudio sobre la dependencia de opioides es que el extracto de metanol completo atenúa la expresión de tolerancia a la morfina, un mecanismo distinto de prevenir su adquisición; este efecto no solo se observó con los principales alcaloides aislados, lo que implica fuertemente a otros compuestos no identificados o interacciones sinérgicas dentro del extracto en la reversión de la tolerancia establecida.

Evaluación en la dirección de la investigación

Han surgido dos líneas de investigación distintas pero complementarias. La primera es un enfoque farmacológico clásico que investiga los efectos complejos del extracto de la planta en el SNC, específicamente en el contexto de la dependencia de opioides. Esta investigación validó el potencial de la planta para tratar trastornos relacionados con el SNC y, de manera importante, distinguió la bioactividad del extracto complejo de la de sus principales componentes conocidos. La segunda es un enfoque biotecnológico centrado en aprovechar el potencial de la planta como fuente de agentes antiinflamatorios. Este trabajo estableció con éxito cultivos de callos, creando una plataforma sostenible para la producción de sus metabolitos secundarios. En conjunto, estas líneas confirman que la reputación tradicional de la planta está bien fundada y justifica una mayor exploración para afecciones neurológicas e inflamatorias.

Perspectivas futuras

Con base en el actual conjunto de investigaciones, se pueden proponer varias direcciones clave para la investigación futura:

- **Aislar e identificar compuestos activos para efectos sobre el SNC:** un siguiente

paso crucial es realizar un fraccionamiento del extracto de metanol mediante bioensayo para aislar e identificar el compuesto o compuestos específicos responsables de atenuar la expresión de tolerancia y dependencia a la morfina. Dado que los principales alcaloides aislados fueron ineficaces por sí solos, esto sugiere que la actividad podría deberse a componentes menores o a un efecto sinérgico entre múltiples constituyentes.

- **Caracterizar y analizar metabolitos de cultivos de callos:** los cultivos de callos establecidos por Pérez González et al., (2022) brindan una excelente oportunidad para estudios posteriores. Las investigaciones futuras deberían centrarse en la caracterización química de los metabolitos secundarios producidos en estos sistemas *in vitro*. Una vez identificados, estos compuestos

deben analizarse para determinar su actividad antiinflamatoria específica utilizando ambos ensayos *in vitro* y modelos *in vivo* de inflamación para validar el uso etnobotánico para la artritis reumatoide.

En conclusión, *Brugmansia arbórea*. Se erige como una valiosa reserva de compuestos bioactivos con un potencial significativo para el desarrollo de nuevos agentes terapéuticos. Su eficacia documentada en la modulación de las vías de dependencia de opioides y su potencial como fuente de fármacos antiinflamatorios la posicionan como una candidata principal para futuras investigaciones. La investigación continua, que conecta la etnobotánica, la farmacología y la biotecnología, será esencial para aprovechar al máximo su potencial terapéutico en el tratamiento de trastornos del sistema nervioso central y enfermedades inflamatorias.

Introduction

Brugmansia arborea (L.) Lagerheim, a member of the Solanaceae family popularly known as Floripondio, is a plant of significant ethnopharmacological interest. With a long and documented history of use in traditional medicine across the Americas, it has recently captured the attention of the biomedical research community for its potential therapeutic applications. The plant's profound physiological effects, rooted in its unique chemical composition, have made it a subject of both reverence in cultural rituals and scientific inquiry in modern laboratories. This article aims to synthesize the current body of knowledge on *B. arborea*, integrating its ethnobotanical background, pharmacognosy, and the findings of recent scientific investigations. By examining its traditional applications as a guide for contemporary research, we can better understand its therapeutic potential. This review will culminate in a discussion of future perspectives for its application in drug discovery and development, beginning with an exploration of its foundational role in traditional medicine (Figure. 1).



Figure 1. *Brugmansia arborea* (L.). Photograph taken by Saul A. Rios Cano and Claudia Mancilla Simbro, Puebla Pue. Mexico, December 2025.

Ethnobotanical Context and Traditional Medicinal Use

The study of ethnobotany provides a critical framework for modern pharmacological research, offering valuable insights derived from centuries of human-plant interaction. For a plant with potent bioactivity like *B. arborea*, understanding its traditional applications is not merely of historical interest; it supplies an essential roadmap for targeted scientific investigation into its chemical constituents and their mechanisms of action. Traditional knowledge helps researchers formulate hypotheses and validate the potential efficacy of natural products, bridging ancestral wisdom with evidence-based medicine (Fig. 2).



Figure 2. *Brugmansia arborea* (L.), photograph taken by Saul A. Rios Cano and Dr. Claudia Mancilla Simbro, at the Faculty of Medicine, Northeastern Complex Campus Teziutlán. Teziutlán, Puebla, Mexico, December 2025.

Global Use: Insights from the Andean Region

The ethnobotanical history of the *Brugmansia* genus is deeply rooted in the cultural and spiritual practices of South America. Research has documented its long-standing role in traditional Andean medicine, particularly in Northern Peru. In this region, *Brugmansia* species have been integral to ritualistic practices, where their potent psychoactive properties are utilized within a structured ceremonial context (De Feo,

2004). This use highlights the plant's significant effects on the central nervous system, a key area of interest for modern pharmacology.

Use in Mexico: Focus on the Valley of Mexico

In Mexico, the traditional application of *B. arborea* has been well-documented, particularly for its anti-inflammatory properties. A recent study identified *B. arborea* as the most consumed medicinal species in the Valley of Mexico for the purpose of alleviating the symptoms associated with rheumatoid arthritis (Pérez González et al., 2022). This specific, localized use against a chronic inflammatory disease provides a powerful ethnopharmacological directive for modern research, demanding a targeted investigation into the plant's chemical profile to isolate the molecules responsible for this anti-inflammatory activity.

Pharmacognosy: Principal Active Compounds

Pharmacognosy is the branch of science concerned with medicinal drugs obtained from plants or other natural sources. Its primary role in natural products research is to isolate and identify the bioactive molecules responsible for a plant's observed physiological and therapeutic effects. In the case of *Brugmansia arborea*, pharmacognostic analysis has been crucial in elucidating the chemical basis for its potent activity. This section details the key chemical constituents that have been isolated from the plant.

A bioassay-oriented study of a methanol extract of *B. arborea* confirmed that the primary class of compounds characteristic of the *Brugmansia* genus is tropane alkaloids. This research led to the successful isolation and identification of three specific tropane alkaloids from the plant (Capasso et al., 1997) (Fig. 3):



Figura 3. Principales componentes de *B. arborea*, DrugBank (Wishart DS, 2004). <https://chem.echa.europa.eu/100.007.188/overviewvivax> en 2024 (Secretaría de Salud, 2025).

The presence of these anticholinergic alkaloids provides a clear pharmacological explanation for the plant's powerful effects on the central nervous system (CNS). This chemical profile underpins its traditional ritualistic use and its potential for modern therapeutic applications targeting CNS pathways, a subject explored in recent biomedical research.

Recent Biomedical Research and Therapeutic Potential

Modern scientific research on medicinal plants serves to validate traditional knowledge, elucidate the underlying mechanisms of action, and explore novel therapeutic applications. By applying rigorous experimental methods, researchers can transform ethnobotanical leads

into evidence-based therapeutic candidates. This section reviews two distinct and recent lines of investigation into the therapeutic potential of *B. arborea*, each reflecting a different aspect of its traditional use: its effects on opioid dependence and its potential for producing anti-inflammatory compounds through biotechnological methods.

Investigation into Effects on Opioid Tolerance and Dependence

Building on the plant's known CNS activity, recent research has explored its potential to modulate opioid tolerance and dependence, a major public health concern.

1. **Background:** The rationale for this investigation was supported by previous findings. *In vitro* binding assays had already demonstrated that methanol and water extracts of *B. arborea* showed affinity for various CNS receptors involved in dependence phenomena, including serotonin (5-HT_{1A}, 5-HT_{2A}, 5-HT_{2C}), dopamine (D₁, D₂), and adrenergic (1, 2) receptors (Nencini et al., 2006). Furthermore, an earlier *in vitro* study showed that alkaloids from the plant could reduce the symptoms of morphine withdrawal (Capasso & De Feo, 2003).
 2. **Study Objective:** The primary aim of the subsequent *in vivo* study was to investigate the activity of a methanol extract of *B. arborea* (BRU). As well as its isolated compounds, on both the acquisition and the expression of morphine tolerance and dependence in mice.
 3. **Key Results on Morphine Tolerance:** The study found that acute administration of the BRU extract at a high dose (30 mg/kg) significantly decreased the expression of morphine tolerance, meaning it helped restore the analgesic effect of morphine in tolerant mice. However, the extract did not attenuate the acquisition
- of tolerance when administered concurrently with morphine over several days.
4. **Key Results on Morphine Dependence:** In the study, repeated administration of morphine successfully induced physical dependence in mice. This dependence was assessed following a challenge with the opioid antagonist naloxone, which precipitated a characteristic set of somatic withdrawal symptoms. The administration of the BRU extract was shown to significantly reduce these withdrawal symptoms, which included jumping, rearing, forepaw tremor, and teeth chattering, thereby demonstrating an attenuating effect on the expression of morphine dependence.
 5. **Role of Pure Alkaloids:** Interestingly, when the pure isolated alkaloids—atropine, apoatropine, and 3-tigloyl-oxitropine—were administered alone, they did not produce a significant effect on withdrawal symptoms compared to the control group. This suggests that the effect of the whole extract may be due to synergistic interactions between multiple compounds or the presence of other, as-yet-unidentified active molecules.

Biotechnological Approaches for Anti-Inflammatory Compound Production

Pioneering research has connected the traditional use of *B. arborea* as an anti-inflammatory agent with modern plant biotechnology, aiming to create a sustainable source of its valuable secondary metabolites.

1. **Rationale:** Motivated directly by the plant's traditional application in the Valley of Mexico for treating symptoms of rheumatoid arthritis, researchers sought to establish an *in-vitro* culture system. The goal was to develop a reliable and sustainable method for producing the plant's secondary metabolites, bypassing agricultural

and environmental variables (Pérez González et al., 2022; Hernández-Amasifuen et al., 2021).

2. **Methodology:** The study employed a plant tissue culture technique using leaf explants of *B. arborea*. Callus formation (callogenesis) was induced by culturing the explants on media containing various concentrations of a cytokinin (kinetin - KIN) and an auxin (1-naphthaleneacetic acid - ANA), which are plant growth regulators.
3. **Primary Outcome:** The researchers reported that callogenesis was successfully induced in all tested concentrations of the growth regulators. Based on the morphology and induction rates, the concentration of 2.5 mg/L of KIN and 1 mg/L of ANA was selected as the most promising cell line to be used for the continuation of the study (Pérez González et al., 2022).

These combined findings from distinct research fields demonstrate the multifaceted potential of *B. arborea*, paving the way for a deeper discussion of its future in medicine.

The scientific investigation of *B. arborea* provides a compelling example of how ethnopharmacology can guide modern drug discovery. This review synthesizes findings that connect the plant's traditional roles to its scientifically validated biological activities, opening promising avenues for future therapeutic development (Pérez-González et al 2025).

Synthesis of Findings

The evidence presented confirms that *B. arborea* is a plant with significant bioactivity, supported by both a history of ethnobotanical use and rigorous scientific analysis. Its traditional applications - ritualistic use in the Andes pointing to CNS effects and its consumption in Mexico for inflammatory conditions like rheumatoid arthritis - are substantiated by modern research. The identification of tropane alkaloids such as

atropine provides a clear chemical basis for their CNS activity. Recent studies have further validated these traditional leads, demonstrating that the plant's extract can modulate opioid dependence pathways and that its cells can be cultured to potentially produce anti-inflammatory compounds. A crucial insight from the opioid dependence study is that the whole methanol extract attenuates the expression of morphine tolerance, a mechanism distinct from preventing its acquisition. This effect was not observed with the principal isolated alkaloids alone, strongly implicating other, unidentified compounds or synergistic interactions within the extract in the reversal of established tolerance.

Evaluation of Research Directions

Two distinct but complementary research paths have emerged. The first is a classic pharmacological approach investigating the complex effects of the plant's extract on the CNS, specifically in the context of opioid dependence. This research validated the plant's potential to treat CNS-related disorders and importantly, distinguished the bioactivity of the complex extract from that of its major known components. The second is a biotechnological approach focused on harnessing the plant's potential as a source of anti-inflammatory agents. This work successfully established callus cultures, creating a sustainable platform for producing its secondary metabolites. Together, these avenues confirm that the plant's traditional reputation is well-founded and warrants further exploration for both neurological and inflammatory conditions.

Future Perspectives

Based on the current body of research, several key directions for future investigation can be proposed:

- **Isolate and Identify Active Compounds for CNS Effects:** A critical next step is to conduct bioassay-guided fractionation of the methanol extract to isolate

and identify the specific compound or compounds responsible for attenuating the expression of morphine tolerance and dependence. Since the major isolated alkaloids were ineffective on their own, this suggests the activity may stem from minor components or a synergistic effect between multiple constituents.

- **Characterize and Test Metabolites from**

- **Callus Cultures:** The callus cultures established by Pérez González et al. (2022) provide an excellent opportunity for further study. Future research should focus on the chemical characterization of the secondary metabolites produced in these in-vitro systems. Once identified, these

compounds should be tested for their specific anti-inflammatory activity using both in vitro assays and in vivo models of inflammation to validate the ethnobotanical use for rheumatoid arthritis.

In conclusion, *B. arborea* stands as a valuable reservoir of bioactive compounds with significant potential for developing novel therapeutic agents. Its documented efficacy in modulating opioid dependence pathways and its promise as a source for anti-inflammatory drugs position it as a prime candidate for further research. Continued investigation bridging ethnobotany, pharmacology, and biotechnology will be essential to fully unlock its therapeutic potential for treating CNS disorders and inflammatory diseases.

Conflicto de intereses

Los autores de este manuscrito declaran que no tienen conflictos de interés.

Declaración de privacidad

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP serán utilizados exclusivamente para los fines indicados por RD-ICUAP y no serán cedidos para ningún otro fin ni facilitados a terceros.

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

Agradecimientos

Esta investigación fue realizada en la facultad de Medicina del Complejo Nororiental Campus Teziutlán, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México, C.P. 72570, Teziutlán, Puebla, México y HybridLab. .Fisiología y Biología Molecular de Células Excitables – Instituto de Fisiología, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, Pue. México, C.P. 72570. <https://fisioybiolmolcelulasexcitables.blogspot.com/2024/04/fisiologia-y-biologia-molecular-celulas.html> <https://orcid.org/0000-0003-3976-3550> Proyecto: Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado, Padrón de Grupos de Investigación Interdisciplinaria: 25073 Bioinformática Inclusiva: discapacidad visual. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, México. "PROYECTO DE ATENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL DE LA LAGUNA PONIENTE DE CIUDAD UNIVERSITARIA" No. VIEP 307 – 2025. Coordinación de Gestión Ambiental de la Coordinación General de Desarrollo Sustentable. BUAP. 2026/ Impacto de la actividad humana: Comunidad Restauración de Laguna de CU BUAP. Puebla, Pue. México. <https://jardinsensorialinclusivo.blogspot.com/2024/10/jardin-sensorial-inclusion-y-bienestar.html>, <https://jardinsensorialinclusivo.blogspot.com/2024/10/jardin-sensorial-inclusion-y-bienestar.html>, https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLScx4XEHI7yIFNQtdtNYf-s5hrpRWkstCxVCe8_Qp9frVhCzlg/viewform

Conflicts of interest

The authors of this manuscript declare that they have no conflicts of interest of any kind.

Privacy statement

The personal data provided by the authors to RD-ICUAP will be used exclusively for the purposes stated by RD-ICUAP and will not be made available for any other purpose or provided to third parties.

The authors disclaim responsibility (ARTIFICIAL INTELLIGENCE). The authors hereby declare that NO generative AI technologies, such as large language models (ChatGPT, COPILOT, etc.) and text-to-image generators, have been used during the writing or editing of this manuscript.

Acknowledgments

This research was conducted at the Faculty of Medicine, Complejo Nororiental Campus Teziutlán, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, Mexico, C.P. 72570, Teziutlán, Puebla, Mexico, and HybridLab. Physiology and Molecular Biology of Excitable Cells – Instituto de Fisiología, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México, C.P. 72570. <https://fisioybiolmolcelulasexcitables.blogspot.com/2024/04/fisiologia-y-biologia-molecular-celulas.html> <https://orcid.org/0000-0003-3976-3550>. Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado, Padrón de Grupos de Investigación Interdisciplinaria: 25073 Bioinformática Inclusiva: discapacidad visual. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, México.

Referencias

- Capasso, A., & de Feo, V. (2003). Alkaloids from *Brugmansia arborea* (L.) Lagerheim reduce morphine withdrawal in vitro. *Phytotherapy research: PTR*, 17(7), 826–829. <https://doi.org/10.1002/ptr.1218>
- Capasso, A., De Feo, V., De Simone, F., & Sorrentino, L. (1997). Activity-directed Isolation of Spasmolytic (anti-cholinergic) Alkaloids from *Brugmansia arborea* (L.) Lagerheim. *International Journal of Pharmacognosy*, 35(1), 43–48. <https://doi.org/10.1076/phbi.35.1.43.13262>
- Vincenzo De Feo. (2004). The Ritual Use of *Brugmansia* Species in Traditional Andean Medicine in Northern Peru. *Economic Botany*, 58, S221–S229. <http://www.jstor.org/stable/4256919>
- Nencini, C., Cavallo, F., Bruni, G., Capasso, A., De Feo, V., De Martino, L., Giorgi, G., & Micheli, L. (2006). Affinity of Iresine herbstii and *Brugmansia arborea* extracts on different cerebral receptors. *Journal of ethnopharmacology*, 105(3), 352–357. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2005.11.022>
- Hernández-Amasifuen, A., Argüelles-Curaca, A., Cortez-Lázaro, A.A. y Díaz-Pillasca, H.B. (2021). Inducción in vitro de callos a partir de explantes foliares en rocoto (*Capsicum pubescens* Ruiz & Pav.). *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. Vol. 34(2):131-140. <http://doi.org/10.17163/lgr.n34.2021.09>
- Pérez González, M. Z., Gutiérrez Rebolledo, G. A., Cruz Sosa, F., & García Martínez, I. (2022). Inducción in-vitro de callos a partir de explantes de hoja de *Brugmansia arborea* con distintos reguladores de crecimiento vegetal [Abstract]. In *Revista Mexicana de Investigación en Productos Naturales, Resúmenes de la 17a Reunión Internacional de Investigación en Productos Naturales* (p. 34). Asociación Mexicana de Investigación en Productos Naturales. https://smbb.mx/congresos%20smbb/zihuatanejo2023/carteles/area_XIII/XIIIC24.pdf
- Pérez-González, M. Z., Del Carmen Juárez-Vázquez, M., Sánchez-Ramos, M., Moreno-Villalba, L., & Jiménez-Arellanes, M. A. (2025). Anti-inflammatory, antioxidant, and acute toxicity of *Brugmansia arborea* extracts from wild plants and shoots obtained by indirect organogenesis. A thermographic assay to anti-inflammatory evaluation. *Biomedicine & pharmacotherapy = Biomedecine & pharmacotherapie*, 186, 117972. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2025.117972>
- Wishart DS, Knox C, Guo AC, Shrivastava S, Hassanali M, Stothard P, Chang Z, Woolsey J. DrugBank: a comprehensive resource for in silico drug discovery and exploration. *Nucleic Acids Res*. 2006 Jan 1;34(Database issue):D668-72.

Recepción: 16.11.2025

Revisión: 30.12.2025

Publicación: 15.01.2026

<https://orcid.org/0009-0006-2672-691X>

<https://orcid.org/0000-0002-6114-1670>

<https://orcid.org/0000-0001-9413-4322>

<https://orcid.org/0000-0003-0545-8232>

<https://orcid.org/0009-0004-0332-3785>

SIMULAR PARA CURAR: EL PAPEL DE LA CIENCIA DIGITAL EN EL DESARROLLO DE NUEVOS FÁRMACOS

SIMULATING TO CURE: THE ROLE OF DIGITAL SCIENCE IN THE DEVELOPMENT OF NEW DRUGS

José Luis Hernández Pérez¹
Maura Cárdenas García*¹
Guadalupe Hernández Linares¹
Israel Quiroga Montes ²
Gabriel Guerrero Luna ¹

¹Benemérita 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.

²Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, Calle 21 Sur 1103, Barrio de Santiago, 72410 Heroica Puebla de Zaragoza, Pue.

Autor de correspondencia:

D.C. Maura Cárdenas García. Correo: maura.cardenas@correo.buap.mx

Resumen

En los últimos años, la simulación *in silico* se ha posicionado como una herramienta clave en el diseño y desarrollo de nuevos fármacos. Mediante modelos computacionales, inteligencia artificial y análisis predictivos, es posible anticipar la interacción entre moléculas bioactivas y sus posibles blancos terapéuticos, optimizando la selección de candidatos antes de los ensayos *in vitro* o *in vivo*. Este artículo presenta una revisión narrativa de investigaciones publicadas entre 2007 y 2025, en las que se destaca la aplicación de la simulación digital en áreas como la oncología, la nutrición, la odontología y enfermedades infecciosas. Herramientas como el docking molecular, la dinámica molecular, los modelos QSAR y las predicciones ADMET han reducido los costos experimentales, minimizado el uso de modelos animales y ayudado a priorizar los compuestos con mayor potencial terapéutico. La evidencia recopilada muestra la transformación de cómo podrían ser las futuras terapias y su tendencia hacia la innovación terapéutica y reducción de los tiempos y costos de investigación.

Palabras clave: *In silico*; Diseño Farmacéutico; Diseño Computarizado de Drogas; Inteligencia Artificial; Desarrollo de medicamentos.

Abstract

In recent years, *in silico* simulation has become a key tool in the design and development of new drugs. Using computational models, artificial intelligence, and predictive analytics, it is possible to anticipate the interaction between bioactive molecules and their potential therapeutic targets, optimizing the selection of candidates before *in vitro* or *in vivo* trials. This article presents a narrative review of research published between 2007 and 2025, highlighting the application of digital simulation in areas such as oncology, nutrition, dentistry, and infectious diseases. Tools such as molecular docking, molecular dynamics, QSAR models, and ADMET predictions have reduced experimental costs, minimized the use of animal models, and helped prioritize compounds with the greatest therapeutic potential. The evidence gathered shows the transformation of what future therapies could look like and their trend toward therapeutic innovation and reduced research time and costs.

Keywords: *In silico* Simulation; Pharmaceutical Design; Drug Design; Artificial Intelligence; Drug Development.

Introducción

¿Sabías que desarrollar un medicamento nuevo puede tomar entre 10 y 15 años y costar alrededor de 2,6 mil millones de dólares? (Möhrle, 2024; Roden, 2023). Ahora imagina otro escenario, en el que las posibles curas para las enfermedades más complejas comiencen su historia no en un tubo de ensayo, sino en la pantalla de una computadora; pues dicho futuro, en realidad, ya empezó.

En la última década, las herramientas informáticas han cambiado bastante la manera en que se realiza el descubrimiento de nuevos fármacos. El enfoque *in silico*, basado en simulaciones digitales, permite modelar el comportamiento de las moléculas y predecir, desde muy temprano, si un compuesto será estable, si se unirá adecuadamente a su blanco terapéutico o si puede resultar tóxico (Chang et al., 2022; Paul et al., 2021; Sliwoski et al., 2013). Gracias a ello, el camino que va de una molécula prometedora a un candidato listo para entrar al laboratorio se ha vuelto mucho más corto (Vamathevan et al., 2019).

Durante buena parte del siglo XX, el desarrollo de fármacos se basaba en el método clásico de “prueba y error”. Se sintetizaban miles de moléculas y se probaban una por una en ensayos biológicos, con la esperanza de que alguna mostrara actividad terapéutica. La química combinatoria que surgió en los años setenta y ochenta permitió generar bibliotecas enormes de compuestos y avanzar un poco más rápido, pero el proceso seguía siendo lento, caro y, en gran medida, aleatorio (Furka, 2022; Talreja & Tiwari, 2024). Muchos proyectos se quedaban a mitad del camino y solo una fracción mínima de los candidatos llegaba a las fases clínicas.

A partir de la década de 2010, la revolución digital y la inteligencia artificial (IA) cambiaron por completo el panorama, ya que hoy es posible evaluar en entornos virtuales, millones de moléculas antes de que exista siquiera el primer frasco en el laboratorio (Vamathevan et al., 2019; Yang et al., 2019).

Algoritmos de aprendizaje automático (Machine Learning) y redes neuronales (Deep Learning) ayudan a anticipar interacciones, toxicidad y eficacia de los compuestos, reduciendo fracasos, ahorrando recursos y acelerando cada etapa del desarrollo de prometedores fármacos (Chen et al., 2018; Paul et al., 2021; Niazi, 2025).

En años recientes, esta estrategia ha permitido diseñar moléculas para enfermedades que durante mucho tiempo se consideraban casi intratables. Por ejemplo, se tiene Rentosertib (medicamento para *fibrosis pulmonar idiopática*), fue identificado y optimizado en sólo 18 meses gracias a herramientas de IA, y ha avanzado rápidamente hacia los ensayos clínicos fase IIa, con datos prometedores tanto en eficacia como en seguridad (Xu et al., 2025), gracias a los modelos de IA generativa y Aprendizaje por refuerzo (Gómez-Bombarelli et al., 2018; Segler et al., 2018). Dicho caso, muestra que la IA no solo analiza datos; sino que también revela patrones y soluciones que serían casi imperceptibles al ojo humano, especialmente en enfermedades raras o tan complejas como el cáncer (Yang et al., 2019) (Ver Imagen 1).



Imagen 1. Contraste entre pasado y presente en el descubrimiento de fármacos. Representación visual de la

metodología de antes que involucraba un proceso largo y tardado, en comparación con la metodología actual, donde los experimentos in silico, permiten un enfoque más rápido y directo.

Elaboración propia de los autores con base en la revisión de datos (generado en Gemini 2.0 (Google), 2025 como herramienta de diseño digital de IA). <https://gemini.google.com>

Del cerebro digital al servicio de la salud

La IA se ha convertido en una especie de cerebro digital que acompaña a la farmacología moderna. Claramente, no sustituye el trabajo de químicos, biólogos y médicos, pero hay que admitir que sí transforma la manera en que se diseñan los nuevos tratamientos. Su fuerza se apoya de varios pilares como son: el modelado molecular, la quimioinformática, el diseño de fármacos asistido por computadora (CADD), el docking molecular, entre otros (Sliwoski et al., 2013; Chang et al., 2022).

Modelado molecular: Darle forma a lo invisible

Imagínate poder tomar una proteína y, como si fuera una pieza de Lego microscópica, girarla, cortarla, pegarle fragmentos y ver qué ocurre; pues el modelado molecular hace justamente eso, pero en una computadora, ya que construye modelos tridimensionales de las moléculas de interés y permite simular cómo se mueven y cómo reaccionan entre sí. Esto ayuda a los investigadores a imaginar escenarios, como: qué pasa si se modifica un grupo químico, si la molécula es más flexible o rígida, o si la proteína cambia de conformación. Antes de gastar tiempo y reactivos en el laboratorio, el modelado molecular puede brindar pistas de qué cambios podrían funcionar y cuáles no (Dror et al., 2012) (ver Imagen 2).

Quimioinformática: Una biblioteca química a un clic

La quimioinformática es como contar con una enorme biblioteca digital de moléculas en la que se puede buscar casi cualquier combinación posible, mediante algoritmos especializados, en dicha biblioteca se analizan millones de

estructuras químicas y se identifican aquellas que valen la pena mirar con más detalle (Sliwoski et al., 2013).

En lugar de examinar los compuestos uno por uno, la quimioinformática funciona como un filtro muy fino, que ayuda a descartar los menos prometedores para quedarse con los compuestos que tienen más probabilidades de convertirse en medicamentos eficaces y seguros. Es, en cierto modo, como buscar una aguja en un pajar, pero usando un imán muy potente (Sliwoski et al., 2013).

Diseño de fármacos asistido por computadora (CADD)

Para tratar una enfermedad pueden existir decenas de miles de moléculas posibles, pero solo unas cuantas cumplen con las características necesarias, las cuales deben ser eficaces, estables, poco tóxicas y fáciles de producir. El CADD está pensado para reducir esa enorme lista a un puñado de opciones prometedoras (Sliwoski et al., 2013).

Mediante simulaciones y modelos predictivos, el CADD ayuda a diseñar a la medida los compuestos más eficaces, al permitir ajustar propiedades como la solubilidad, la carga eléctrica o la flexibilidad de la molécula y anticipar cómo se comportará en el organismo, incluso antes de sintetizarla (Sliwoski et al., 2013).

Docking molecular: La llave y la cerradura digitales

El docking molecular suele explicarse con una metáfora muy sencilla, siendo la proteína una cerradura y el fármaco la llave, por lo cual su objetivo principal es encontrar la llave que encaje mejor para abrir o bloquear la cerradura correcta.

Los programas de docking prueban virtualmente miles o millones de llaves sobre una misma cerradura, ya que calculan qué tan bien encaja cada una y qué tipo de interacciones se forman. Así se identifican, en cuestión de minutos, los compuestos que tienen más posibilidades de funcionar,

los cuales pasan a la siguiente fase de estudio, brindando con ello un ahorro enorme en tiempo y recursos (Morris et al., 2009) (ver Imagen 2).

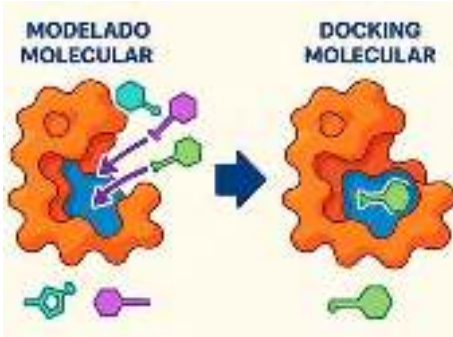


Imagen 2. Modelado molecular y docking molecular. Representación visual de la metáfora cerradura-llave, donde la proteína blanco actúa como la cerradura y el compuesto como la llave que se aproxima y acopla de manera precisa al sitio activo de la proteína, mediante una simulación digital.

Elaboración propia de los autores con base en la revisión de datos (generado en OpenAI GPT-5, 2025 como herramienta de diseño digital de IA). <https://chatgpt.com>

Dinámica molecular: El baile de las moléculas

Cuando pensamos en un medicamento uniéndose a su proteína blanco, es fácil imaginar dos piezas rígidas que encajan como rompecabezas, pero en realidad, las moléculas no se quedan quietas, sino que vibran, se doblan, giran, se separan y vuelven a unirse; dichos movimientos ocurren constantemente, como una especie de baile microscópico.

La dinámica molecular utiliza simulaciones para observar ese baile a lo largo del tiempo, lo cual permite estudiar si una molécula permanece unida a la proteína blanco, si se desliza, si se deforma o si la interacción se rompe con facilidad. También ayuda a entender qué cambios podrían mejorar la estabilidad del complejo sistema y qué condiciones favorecen o dificultan su unión (Dror et al., 2012; Hospital et al., 2015). Con dicha información, los científicos

conocen mejor el mecanismo de acción de un fármaco incluso antes de llevarlo al laboratorio (ver Imagen 3).

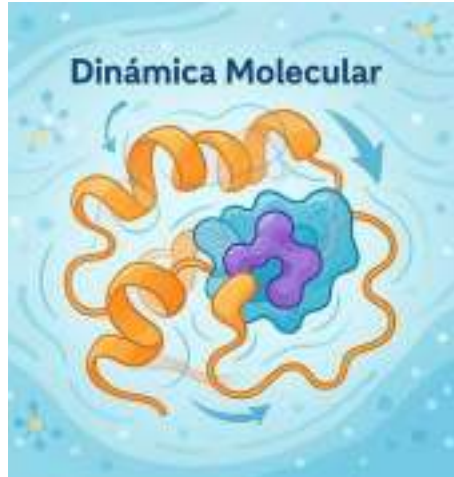


Imagen 3. Dinámica molecular.

Representación visual del movimiento constante, flexibilidad e interacciones de las proteínas y los compuestos estudiados en un entorno simulado.

Elaboración propia de los autores con base en la revisión de datos (generado en OpenAI GPT-5, 2025 como herramienta de diseño digital de IA). <https://chatgpt.com>

QSAR y QSPR: Aprender de las moléculas conocidas

Otra herramienta clave son los modelos QSAR (Relación Cuantitativa Estructura-Actividad) y QSPR (Relación Cuantitativa Estructura-Propiedad). En esencia, se apoyan en un principio sencillo: las moléculas con estructuras parecidas tienden a comportarse de manera similar (Tropsha, 2010; Gramatica, 2007).

Al alimentar a los algoritmos con datos duros de miles de compuestos ya estudiados, la IA aprende qué rasgos estructurales se asocian con ciertos efectos de mayor o menor actividad, buena absorción, toxicidad, etcétera. A partir de lo anterior, se puede predecir cómo podría comportarse una molécula nueva con solo ver su fórmula (Raies & Bajic, 2016).

Estos modelos también permiten estimar propiedades ADMET (absorción, distribución, metabolismo, excreción y toxicidad) de compuestos que todavía no existen en un frasco real. De esta forma, se descartan desde el inicio las opciones que probablemente serían tóxicas o inestables y ayuda a concentrar los esfuerzos, tiempo y dinero en las moléculas con más probabilidad de éxito (Raies & Bajic, 2016).

Aprendizaje automático e inteligencia artificial: Los nuevos asistentes del laboratorio

El verdadero impulso de la IA en farmacología viene del machine learning y el deep learning, las cuales son técnicas que utilizan redes neuronales artificiales, formadas por capas de nodos que se conectan entre sí y se ajustan conforme analizan más datos (Chen et al., 2018; Yang et al., 2019; Vamathevan et al., 2019).

Podríamos imaginarlo como una cadena de filtros, en donde los primeros detectan características simples (por ejemplo, el tipo de átomos o la presencia de ciertos grupos funcionales), los siguientes filtran los patrones más complejos (como la forma de la molécula o su flexibilidad), y las últimas capas hacen una combinación de toda esa información para hacer predicciones, por ejemplo: si la molécula será activa, si será tóxica o si vale la pena seguir investigando (Chen et al., 2018) (ver Imagen 4).

Química generativa y diseño de *novo*

Uno de los avances más llamativos es la llamada química generativa, debido a que, en lugar de limitarnos a analizar moléculas ya conocidas, ciertos modelos de IA pueden inventar estructuras nuevas que cumplan criterios específicos, como: que se disuelvan bien, que se unan

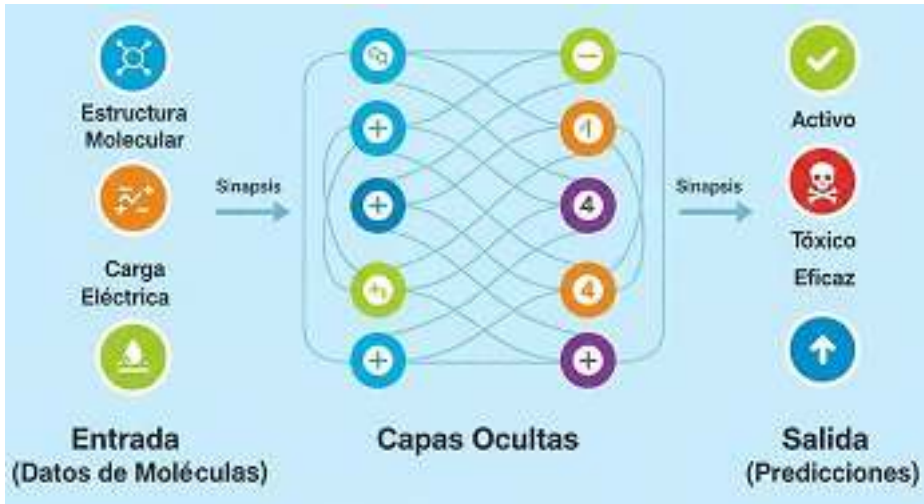


Imagen 4. Aprendizaje Automático e Inteligencia Artificial.

Representación visual de la metodología que emplea la IA para la toma de decisiones y predicciones mediante algoritmos y redes neuronales, inspiradas en la estructura y funcionamiento del cerebro humano.

Elaboración propia de los autores con base en la revisión de datos (generado en Gemini 2.0 (Google), 2025 como herramienta de diseño digital de IA). <https://gemini.google.com>

adecuadamente a una proteína, que no sean tóxicas, etcétera, generando moléculas prometedoras desde cero (Gómez-Bombarelli et al., 2018; Segler et al., 2018) (ver Imagen 5).



Imagen 5. La IA en diseño de *novo*.

Representación visual de la IA en la fase *in silico* para el desarrollo de nuevas estructuras moleculares optimizadas bajo criterios específicos.

Elaboración propia de los autores con base en la revisión de datos (generado en OpenAI GPT-5, 2025 como herramienta de diseño digital de IA). <https://chatgpt.com>

Aprendizaje por refuerzo

El *aprendizaje por refuerzo* funciona de manera similar a como se entrena un jugador en un videojuego, donde el sistema prueba distintas estrategias y recibe una especie de recompensa, cuando se acerca al resultado deseado. En el contexto farmacéutico, dichas jugadas pueden ser modificaciones químicas, rutas de síntesis o decisiones sobre qué compuestos se deberían seguir probando, por lo que, con el tiempo, la IA aprende qué caminos son más eficientes (Segler et al., 2018).

Aplicaciones transformadoras de la IA en salud

Por lo mencionado anteriormente, si creías que la inteligencia artificial solo estaba presente en los laboratorios de química computacional,

permítete informarte que poco a poco se ha ido integrando a distintas áreas de la medicina y la salud pública.

Cáncer: Terapias más personalizadas

En oncología, la IA se utiliza para analizar el genoma de los tumores y el perfil molecular de cada paciente, ya que, con esa información, es posible predecir qué medicamentos tienen más probabilidades de funcionar y cuáles podrían generar efectos adversos. Esto acerca cada vez más a una especie de medicina de precisión, donde el tratamiento se adapta a la biología específica de cada persona (Kourou et al., 2014; Esteva et al., 2019).

Además, los algoritmos ayudan a descubrir biomarcadores, a través de pequeñas señales en la

sangre, en el ADN o en las imágenes médicas que indican la presencia de un tumor o la respuesta

a una terapia (Kourou et al., 2014; Esteva et al., 2019) (ver Imagen 6).

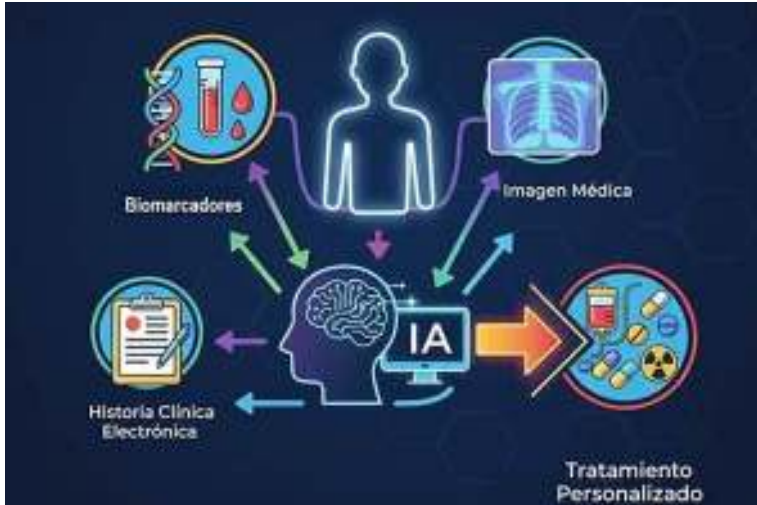


Imagen 6. Terapias y tratamientos personalizados.

Representación visual de un enfoque que utiliza la mayor cantidad de información disponible de cada persona para prevenir, diagnosticar y tratar enfermedades de manera más personalizada y efectiva.

Elaboración propia de los autores con base en la revisión de datos (generado en Gemini 2.0 (Google), 2025 como herramienta de diseño digital de IA). <https://gemini.google.com>

Enfermedades infecciosas: Adelantarse a las amenazas

En el campo de las infecciones, la IA ha servido para modelar proteínas de virus emergentes, como ocurrió con SARS-CoV-2, y así ayudar a diseñar vacunas y antivirales en tiempos récord (Stokes et al., 2020). También se ha utilizado para buscar nuevos antibióticos en un momento como el nuestro, donde la resistencia bacteriana forma parte de un problema global (Stokes et al., 2020).

Nutrición y salud personalizada

Otro ámbito en crecimiento es la nutrición de precisión, debido a que, al analizar el microbioma intestinal, los hábitos alimentarios y, en algunos casos, inclusive el ADN de una persona, la IA puede proponer recomendaciones dietéticas más ajustadas a cada organismo. Paralela-

mente, los modelos computacionales ayudan a identificar compuestos bioactivos en alimentos que podrían aprovecharse como nutracéuticos (Atwal, 2024) (ver Imagen 7).

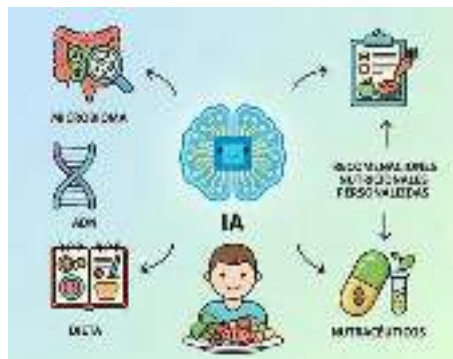


Imagen 7. Nutrición asistida por IA.

Representación visual donde la integración de diversos datos individuales (microbioma, dieta, ADN) pueden gene-

rar recomendaciones nutricionales personalizadas y en el descubrimiento de productos que proporcionen beneficios adicionales del valor nutricional básico.

Elaboración propia de los autores con base en la revisión de datos (generados en Gemini 2.0 (Google), 2025 como herramienta de diseño digital de IA). <https://gemini.google.com>

Odontología y biomateriales

La odontología no se queda atrás, ya que la IA se utiliza para diseñar nuevos materiales de restauración más resistentes y biocompatibles, así como para analizar radiografías, tomografías y modelos 3D. Además, los sistemas inteligentes pueden detectar caries o lesiones periodontales incipientes que a simple vista podrían pasar desapercibidas, lo cual permite ofrecer tratamientos menos invasivos y más oportunos (Schwendicke et al., 2020) (ver Imagen 8).

El lado oscuro y la brújula ética

Como toda tecnología, la IA trae consigo dilemas éticos que no pueden ignorarse. Uno de ellos tiene que ver con los datos, debido a que los algoritmos aprenden a partir de la información que se les proporciona; si esa información proviene sobre todo de ciertas regiones o grupos étnicos, es posible que los resultados no sean fiables para otras poblaciones (Obermeyer et al., 2019; Morley et al., 2020).

Así, un medicamento optimizado principalmente con datos de pacientes europeos podría no comportarse igual en comunidades de Asia, África o América Latina, dando pie a la formación de escenas mentales, donde si la innovación se concentra en unos cuantos países, la brecha en el acceso a los tratamientos podría hacerse aún más grande. De ahí la importancia de construir



Imagen 8. IA en la odontología.

Representación visual del impacto que está generando la IA en la odontología, al brindar diagnósticos de precisión y optimizar el diseño de materiales biocompatibles de restauración.

Elaboración propia de los autores con base en la revisión de datos (generado en Gemini 2.0 (Google), 2025 como herramienta de diseño digital de IA). <https://gemini.google.com>

bases de datos diversas y representativas que incluyan a las regiones con menos recursos, y sobre todo el impulsar colaboraciones internacionales (Morley et al., 2020).

Otro punto clave es el papel de los profesionales de la salud, si bien la IA no viene a sustituirlos, si cambia su manera de trabajar, ya que los médicos, químicos, biólogos y farmacólogos se ven forzados de cierta manera aprender a interpretar los resultados de los algoritmos, cuestionarlos cuando sea necesario y combinar ese insumo con su experiencia clínica y científica. En otras palabras, deben convertirse en traductores

entre el lenguaje de la máquina y la realidad del paciente (Obermeyer et al., 2019).

También existen preguntas legales todavía abiertas, como es: si un fármaco diseñado con IA ocasiona un efecto adverso inesperado, ¿quién es responsable?, ¿el programador, la empresa farmacéutica, el equipo médico o el propietario del algoritmo?, por ello las agencias reguladoras de todo el mundo están trabajando para actualizar normas y guías que permitan evaluar adecuadamente estas nuevas tecnologías (Morley et al., 2020; Obermeyer et al., 2019) (ver Imagen 9).



Imagen 9. Implicaciones éticas y sociales de IA en salud.

Representación de los pros y los contras, así como de los desafíos éticos de la IA aplicada en la fase *in silico* para el desarrollo de compuestos químicos prometedores en salud, resaltando la necesidad de equilibrar la innovación con la equidad.

Elaboración propia de los autores con base en la revisión de datos (generado en OpenAI GPT-5, 2025 como herramienta de diseño digital de IA). <https://chatgpt.com>

Desafíos y perspectivas futuras

Si bien el futuro inmediato exige marcos regulatorios flexibles, que sean capaces de adaptarse al ritmo con el que evoluciona la IA, hay que reconocer que será necesario fortalecer la vigilancia posterior a la comercialización, la transparencia en los modelos utilizados y la auditoría independiente de los sistemas de IA que intervienen en el desarrollo de fármacos (McLennan et al., 2020).

Aunque, también hará falta invertir en formación continua, ya que los profesionales de la salud deberán familiarizarse con los conceptos básicos de ciencia de datos e inteligencia artificial; mientras que los expertos en IA necesitarán comprender mejor la complejidad biológica y clínica, para que pueda consolidarse una colaboración real entre ambos mundos (Char et al., 2018) (ver Imagen 10).

Conclusión

A pesar de los retos que se tienen, resulta difícil imaginar el futuro de la farmacología sin

inteligencia artificial. Dicha tecnología está acelerando el descubrimiento de compuestos terapéuticos, reduciendo costos, mejorando las predicciones sobre eficacia y seguridad, y disminuyendo el uso de modelos animales (Paul et al., 2021; Vamathevan et al., 2019; Niazi, 2025). Pero, sobre todo, está abriendo la puerta a tratamientos más personalizados y a la posibilidad de abordar enfermedades que antes parecían no tener salida (Esteva et al., 2019; Yang et al., 2019).

Sin embargo, hay que recordar, que la IA no es una solución mágica; si bien es una herramienta poderosa que amplifica nuestras capacidades, también es una herramienta que necesita la guía de los criterios humanos de ética y sentido de responsabilidad. Por lo cual, el desafío no es elegir entre humanos o máquinas, sino el aprender a trabajar juntos, ya que, si logramos que esta colaboración se base en la equidad, la transparencia y el acceso justo a los beneficios, la ciencia digital podrá ponerse al servicio de toda la sociedad y no solo de unos cuantos (Morley et al., 2020; McLennan et al., 2020).



Imagen 10. Colaboración y formación continua entre IA y humanos.

Representación visual que refuerza la idea de que la IA no reemplaza, sino que complementa y potencia el esfuerzo humano para el desarrollo futuro.

Elaboración propia de los autores con base en la revisión de datos (generado en Gemini 2.0 (Google), 2025 como herramienta de diseño digital de IA). <https://gemini.google.com>

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 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

Cobos Ontiveros agradece a la Secretaría de Ciencias Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) antes CONACYT por la beca de Estancia Posdoctoral (CVU 623751). 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

- Atwal, K. (2024). Artificial intelligence in clinical nutrition and dietetics: A brief overview of current evidence. *Nutrition in Clinical Practice*, 39(4), 736–742. <https://doi.org/10.1002/ncp.11150>
- Chang, Y., Hawkins, B. A., Du, J. J., Groundwater, P. W., Hibbs, D. E., & Lai, F. (2022). A guide to in silico drug design. Springer. <https://doi.org/10.1038/s41392-022-01166-6>
- Chen, H., Engkvist, O., Wang, Y., Olivecrona, M., & Blaschke, T. (2018). The rise of deep learning in drug discovery. *Drug Discovery Today*, 23(6), 1241–1250. <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2018.01.039>
- Char, D. S., Shah, N. H., & Verghese, A. (2018). The promise and peril of artificial intelligence in medicine. *JAMA*, 320(19), 2058–2059. <https://doi.org/10.1001/jama.2018.17525>
- Dror, R. O., Dirks, R. M., Grossman, J. P., Xu, H., & Shaw, D. E. (2012). Biomolecular simulation: A computational microscope for molecular biology. *Annual Review of Biophysics*, 41, 429–452. <https://doi.org/10.1146/annurev-biophys-042910-155245>
- Esteva, A., Robicquet, A., Ramsundar, B., Kuleshov, V., DePristo, M., Chou, K., Cui, C., Corrado, G., Thrun, S., & Dean, J. (2019). A guide to deep learning in healthcare. *Nature Medicine*, 25(1), 24–29. <https://doi.org/10.1038/s41591-018-0316-z>
- Furka, Á. (2022). Forty years of combinatorial technology. *Drug Discovery Today*, 27(10), 103308. <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2022.103308>
- Gómez-Bombarelli, R., Wei, J. N., Duvenaud, D., Hernández-Lobato, J. M., Sánchez-Lengeling, B., Sheberla, D., Aguilera-Iparraguirre, J., Hirzel, T. D., Adams, R. P., & Aspuru-Guzik, A. (2018). Automatic chemical design using a data-driven continuous representation of molecules. *ACS Central Science*, 4(2), 268–276. <https://doi.org/10.1021/acscentsci.7b00572>
- Gramatica, P. (2007). Principles of QSAR model validation: Internal and external. *QSAR & Combinatorial Science*, 26(5), 694–701. <https://doi.org/10.1002/qsar.200610151>
- Hospital, A., Goñi, J. R., Orozco, M., & Gelpí, J. L. (2015). Molecular dynamics simulations: Advances and applications. *Advances and Applications in Bioinformatics and Chemistry*, 8, 37–47. <https://doi.org/10.2147/AABC.S70333>
- McLennan, S., Fiske, A., Celi, L. A., & Lehmann, L. S. (2020). The ethical implications of AI in clinical practice: a systematic review. *Journal of Medical Ethics*, 46(10), 693–700.
- Kourou, K., Exarchos, T. P., Exarchos, K. P., Karamouzis, M. V., & Fotiadis, D. I. (2014). Machine learning applications in cancer prognosis and prediction. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 13, 8–17. <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2014.11.005>
- Möhrle, J. J. (2024). How long does it take to develop a new drug? *The Lancet Regional Health – Europe*, 43, 100998.
- Morley, J., Machado, C. C. V., Burr, C., Cows, J., Joshi, I., Taddeo, M., & Floridi, L. (2020). The ethics of AI in health care: A mapping review. *Social Science & Medicine*, 260, 113172. <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2020.113172>
- Morris, G. M., Huey, R., Lindstrom, W., Sanner, M. F., Belew, R. K., Goodsell, D. S., & Olson, A. J. (2009). AutoDock4 and AutoDockTools4: Automated docking with selective receptor flexibility. *Journal of Computational Chemistry*, 30(16), 2785–2791. <https://doi.org/10.1002/jcc.21256>
- Niazi, S. K. (2025). Artificial intelligence in small-molecule drug discovery: A critical review of methods, applications, and real-world outcomes. *Pharmaceuticals*, 18(9), 1271. <https://doi.org/10.3390/ph18091271>
- Obermeyer, Z., Powers, B., Vogeli, C., & Mullainathan, S. (2019). Dissecting racial bias in an algorithm used to manage the health of populations. *Science*, 366(6464), 447–453. <https://doi.org/10.1126/science.aax2342>
- Paul, D., Sanap, G., Shenoy, S., Kalyane, D., Kalia, K., & Tekade, R. K. (2021). Artificial intelligence in drug discovery and development. *Drug Discovery Today*, 26(1), 80–93. <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2020.10.010>

- Raies, A. B., & Bajic, V. B. (2016). In silico toxicology: Computational methods for the prediction of chemical toxicity. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Molecular Science*, 6(2), 147–172. <https://doi.org/10.1002/wcms.1240>
- Roden, B. (2023, August 10). The staggering cost of drug development: A look at the numbers. *Greenfield Chemical*. <https://greenfieldchemical.com/2023/08/10/the-staggering-cost-of-drug-development-a-look-at-the-numbers/>
- Schwendicke, F., Samek, W., & Krois, J. (2020). Artificial intelligence in dentistry: Chances and challenges. *Journal of Dental Research*, 99(7), 769–774. <https://doi.org/10.1177/0022034520915714>
- Segler, M. H. S., Preuss, M., & Waller, M. P. (2018). Planning chemical syntheses with deep neural networks and symbolic AI. *Nature*, 555(7698), 604–610. <https://doi.org/10.1038/nature25978>
- Shreya Talreja, & Tiwari, S. (2024). From one to millions: The revolution of combinatorial chemistry. *Journal of Analytical Techniques and Research*, 6, 37–42.
- Sliwoski, G., Kothiwale, S., Meiler, J., & Lowe, E. W. (2013). Computational methods in drug discovery. *Pharmacological Reviews*, 66(1), 334–395. <https://doi.org/10.1124/pr.112.007336>
- Stokes, J. M., Yang, K., Swanson, K., Jin, W., Cubillos-Ruiz, A., Donghia, N. M., ... Collins, J. J. (2020). A deep learning approach to antibiotic discovery. *Cell*, 180(4), 688–702.e13. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2020.01.021>
- Tropsha, A. (2010). Best practices for QSAR model development, validation, and exploitation. *Molecular Informatics*, 29(6–7), 476–488. <https://doi.org/10.1002/minf.201000061>
- Vamathevan, J., Clark, D., Czodrowski, P., Dunham, I., Ferran, E., Lee, G., Li, B., Madabhushi, A., Shah, P., Spitzer, M., & Zhao, S. (2019). Applications of machine learning in drug discovery and development. *Nature Reviews Drug Discovery*, 18(6), 463–477. <https://doi.org/10.1038/s41573-019-0024-5>
- Xu, Z., Ren, F., Wang, P., Cao, J., Tan, C., Ma, D., Zhao, L., Dai, J., Ding, Y., Fang, H., Li, H., Liu, H., Luo, F., Meng, Y., Pan, P., Xiang, P., Xiao, Z., Rao, S., Satler, C., Liu, S., Lv, Y., Zhao, H., Chen, S., Cui, H., Korzinkin, M., Gennert, D., & Zhavoronkov, A. (2025). A generative AI-discovered TNiK inhibitor for idiopathic pulmonary fibrosis: a randomized phase 2a trial. *Nature Medicine*, 31(8), 2602–2610. <https://doi.org/10.1038/s41591-025-03743-2>
- Yang, X., Wang, Y., Byrne, R., Schneider, G., & Yang, S. (2019). Concepts of artificial intelligence for computer-assisted drug discovery. *Chemical Reviews*, 119(18), 10520–10594. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00728>

Glosario

- ADMET:** Acrónimo de Absorción, Distribución, Metabolismo, Excreción y Toxicidad. Conjunto de parámetros que permiten predecir el comportamiento de un fármaco dentro del organismo antes de realizar pruebas en laboratorio.
- Sintetizar:** Consiste en combinar de manera controlada dos o más sustancias o compuestos simples (llamados reactivos) para formar una sustancia nueva y más compleja (producto), mediante procesos físicos y químicos.
- Fases clínicas:** Etapas en el proceso de desarrollo de medicamentos en las que se estudia su seguridad, eficacia y posibles efectos secundarios mediante ensayos controlados en seres humanos, que usualmente se dividen en cuatro fases principales.
- Ensayos clínicos fase IIa:** Estudio piloto realizado en un número reducido de pacientes que tiene como objetivo principal obtener los primeros indicios de eficacia terapéutica de un nuevo compuesto o tratamiento, en el que se determina si la eficacia observada es suficiente como para justificar estudios posteriores.
- Fibrosis pulmonar Idiopática (FPI):** Enfermedad pulmonar crónica y progresiva que se caracteriza por la aparición de cicatrices (fibrosis) en el tejido pulmonar, lo que provoca el endurecimiento y pérdida de flexibilidad de los pulmones. El término idiopática indica que se desconoce la causa de la enfermedad.
- Química combinatoria:** Técnica avanzada en química que permite la síntesis rápida y simultánea de grandes cantidades de compuestos diferentes pero relacionados entre sí, para generar todas las combinaciones posibles.
- Quimioinformática:** Disciplina científica que utiliza métodos y herramientas computacionales para analizar, interpretar y transformar datos químicos en información útil, con el objetivo de identificar, diseñar y optimizar compuestos para aplicaciones farmacéuticas y otras áreas de la química.
- CADD (Diseño de fármacos asistido por computadora):** Campo interdisciplinario que utiliza métodos y herramientas computacionales para acelerar, optimizar y facilitar el proceso de descubrimiento, diseño y desarrollo de nuevos medicamentos.
- Modelado molecular:** Técnica computacional que permite representar, simular y predecir el comportamiento y las probables propiedades de moléculas y sistemas moleculares.
- Docking molecular:** Técnica computacional que simula la interacción entre una molécula (ligando) y su receptor biológico (por ejemplo, una proteína), para estimar la afinidad de unión y posibles efectos terapéuticos.
- Dinámica molecular:** Método de simulación que modela el movimiento de átomos y moléculas en el tiempo, permitiendo analizar la estabilidad de complejos biológicos o farmacológicos.
- QSAR (Quantitative Structure Activity Relationship):** Modelo matemático que correlaciona las propiedades químicas de un compuesto con su actividad biológica, usado para diseñar y optimizar medicamentos.
- QSPR (Relación Cuantitativa Estructura-Propiedad):** Metodología utilizada en química computacional y farmacología para predecir diversas propiedades físicas, químicas o biológicas de una molécula a partir de su estructura.
- In silico:** Expresión latina que significa "en silicio", utilizada para describir experimentos realizados por computadora mediante simulaciones digitales.
- In vitro:** Expresión latina que significa "en vidrio". Hace referencia a los experimentos realizados fuera de un organismo vivo, generalmente en condiciones controladas de laboratorio, como en tubos de ensayo, placas de Petri o cultivos celulares.
- In vivo:** Significa "en un ser vivo" y describe los experimentos que se llevan a cabo dentro de organismos vivos, como animales de laboratorio o, en etapas clínicas, en seres humanos, permitiendo observar los efectos reales de un tratamiento o compuesto dentro del sistema biológico.
- Química generativa:** Disciplina que utiliza modelos avanzados de inteligencia artificial para diseñar, crear y predecir nuevas estructuras moleculares con propiedades específicas. Su metodología no se limita a modificar moléculas conocidas, sino que puede inventar desde cero compuestos nuevos.

Machine Learning (Algoritmos de aprendizaje automático): Rama de la inteligencia artificial que permite que los sistemas aprendan patrones a partir de grandes volúmenes de datos, sin ser programados explícitamente.

Deep Learning (Redes neuronales): Es un subconjunto del aprendizaje automático y la inteligencia artificial que utiliza redes neuronales artificiales multicapa inspiradas en la estructura y el funcionamiento del cerebro humano.

Inteligencia Artificial (IA): Conjunto de técnicas que buscan imitar procesos cognitivos humanos como el razonamiento o la toma de decisiones mediante algoritmos y redes neuronales.

Diseño de novo: Metodología científica y computacional que consiste en crear desde cero nuevas estructuras moleculares, proteínas o compuestos químicos, partiendo únicamente de información sobre el objetivo biológico sin usar moléculas conocidas como punto de partida.

Aprendizaje por refuerzo: Rama del machine learning, en la que un agente aprende a tomar decisiones óptimas a través de la interacción con un entorno, obteniendo recompensas o penalizaciones en función de las acciones que realiza.

Biomarcadores: Son moléculas, características biológicas o sustancias que se pueden medir objetivamente en muestras del cuerpo y que sirven como indicadores de un proceso biológico normal, estado patológico o respuesta a un tratamiento.

SARS-CoV-2 (Coronavirus 2 del Síndrome Respiratorio

Agudo Severo): Virus de la familia de los coronavirus que causa la enfermedad COVID-19. Es un virus ARN de cadena sencilla y polaridad positiva, envuelto, perteneciente al género Betacoronavirus.

Medicina de precisión: Enfoque médico innovador que utiliza información genética, molecular, ambiental y del estilo de vida de cada persona para prevenir, diagnosticar y tratar enfermedades de forma más personalizada y efectiva.

Microbioma Intestinal: Hace referencia a la comunidad completa de microorganismos (principalmente bacterias, virus, hongos y otros microbios) que residen en el tracto gastrointestinal de un ser humano o animal.

Nutracéuticos: Son productos derivados de fuentes alimenticias que se presentan en formas concentradas, como cápsulas o polvos, y que proporcionan beneficios adicionales para la salud más allá del valor nutricional básico de los alimentos.

Biomateriales: Sustancias, materiales o dispositivos diseñados para interactuar con sistemas biológicos, ya sea con fines médicos o terapéuticos.

Biocompatibles: Materiales que pueden estar en contacto directo con tejidos vivos, sin provocar reacciones adversas significativas como toxicidad, inflamación, alergias o rechazo inmunitario.

Lesiones periodontales Incipientes: Alteraciones iniciales en los tejidos de soporte de los dientes (encía, ligamento periodontal, hueso alveolar) en una etapa temprana.

Recepción: 15.11.2025

Revisión: 30.12.2025

Publicación: 15.01.2026

<https://orcid.org/0009-0001-7597-2635>

<https://orcid.org/0000-0002-1932-8757>

ZEOLITAS NANOESTRUCTURADAS: APLICACIONES BIOMÉDICAS Y POTENCIAL TERAPÉUTICO EN ENFERMEDADES CRÓNICAS

NANOSTRUCTURED ZEOLITES: BIOMEDICAL APPLICATIONS AND THERAPEUTIC POTENTIAL IN CHRONIC DISEASES

Lizbeth Mota Magaña¹

Miguel Ángel Hernández Espinosa²

¹Estudiante de Doctorado en Investigación y Educación para la Salud, Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, Pue. México

²Departamento de Investigación en Zeolitas, Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, Pue. México

Correos:

mm224570423@alm.buap.mx

Resumen

Las zeolitas son minerales que pueden originarse a partir de formaciones rocosas o ser sintetizados en el laboratorio, y se caracterizan por una amplia diversidad de aplicaciones. Su composición química les confiere una alta capacidad de absorción y de intercambio iónico. Además, su estructura cristalina ordenada en una red tridimensional de microporos las convierte en excelentes materiales de soporte y vehículos para diversas sustancias. Estas propiedades han sido ampliamente aprovechadas en la industria y en la agricultura. No obstante, a pesar de ser materiales inorgánicos, su uso también se ha explorado en aplicaciones animales y humanas, particularmente en el ámbito de la salud y la biomedicina. El avance reciente en su estudio ha permitido evaluar su utilidad en el tratamiento de enfermedades crónicas como la diabetes. Algunos trabajos sugieren que puede contribuir con el control de la glucosa, y en el caso de las complicaciones asociadas, favorecer el proceso de cicatrización en úlceras por pie diabético, gracias a su efecto hemostático y de reparación tisular. A la luz de la evidencia disponible, las zeolitas se presentan como una alternativa prometedora para el desarrollo de nuevas herramientas terapéuticas con aplicaciones biomédicas diversas.

Palabras clave: aplicaciones biomédicas, zeolitas nanoestructuradas, enfermedades crónicas.

Abstract

Zeolites are minerals that can be formed from rock sediments or be synthesized in a laboratory. They have a wide variety of applications. Their chemical composition gives them a high absorption and ion-exchange capacity. Furthermore, their ordered, three-dimensional crystalline structure consisting of micropores makes them excellent support materials and vehicles for various substances, and these properties are widely exploited in industry and agriculture. However, despite being inorganic materials, zeolites have also been explored for use in animal and human applications, particularly in health and biomedicine. Recent advances in their study have enabled their potential usefulness in treating chronic diseases such as diabetes to be evaluated. Some studies suggest that zeolites can contribute to glucose control and promote the healing process in diabetic foot ulcers in the event of associated complications, thanks to their hemostatic and tissue repair effects. Available evidence suggests that zeolites are a promising alternative for developing new therapeutic tools with diverse medical applications.

Keywords: biomedical applications, nanostructured zeolites, chronic diseases.

Introducción

Las zeolitas son minerales porosos, conformados principalmente por aluminosilicatos. Su estructura se organiza por marcos tridimensionales bien definidos, integrados por átomos de oxígeno (O), aluminio (Al) y silicio (Si). Esta arquitectura les otorga propiedades únicas, como la capacidad de funcionar como tamices moleculares, útiles para purificar o separar sustancias, así como una notable absorción de agua y un intercambio iónico muy específico (Derakhshankhah et al., 2020; Serati-Nouri et al., 2020). Esta estructura que se forma resulta en una red interconectada de poros, que resulta química y biológicamente muy conveniente.

De acuerdo con la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC), los poros de las zeolitas pueden clasificarse en tres categorías según su tamaño (figura 1): macroporos con diámetros mayores a 50 nm, mesoporos, de 2 a 50 nm y microporos, menores a 2 nm. En general, las partículas menores a 100 nm se consideran sólidos porosos de tamaño nanométrico (Derakhshankhah et al., 2020).

Una característica clave es la relación silicio/aluminio (Si/Al), que define si una zeolita es más hidrofílica o hidrofóbica, su estabilidad frente a compuestos ácidos y su capacidad de intercam

bio iónico. Al igual que sucede con materiales arcillosos, sus propiedades pueden modificarse o adaptarse para sus diferentes usos (Souza et al., 2023).

Las zeolitas pueden ser naturales o sintéticas. Las naturales de yacimientos bien identificados y hasta ahora se han documentado alrededor de 40 tipos, principalmente en rocas volcánicas y sedimentarias. Entre las más utilizadas destacan la chabazita, clinoptilolita y mordenita. En contraste, ya se han desarrollado cerca de 200 zeolitas sintéticas, las cuales tienen amplios usos industriales como la catálisis, adsorción en procesos petroquímicos detergentes, tratamiento de aguas residuales, captura de metales pesados, separación de gases o liberación controlada de nutrientes y otros compuestos en agricultura (Serati-Nouri et al., 2020; Pandya et al., 2024).

Más recientemente, las aplicaciones de las zeolitas se han expandido hacia los campos biológico y biomédico. Debido a su baja citotoxicidad, su capacidad de liberar sustancias de manera controlada y su alta adaptabilidad para cargar compuestos en sus poros, han impulsado su uso en veterinaria, zootecnia y diversas áreas de la salud humana, donde se investigan como alternativas para problemas clínicos complejos (Souza et al., 2023).



Figura 1. Representación de las estructuras derivadas de las zeolitas.

Creado con BioRender <https://BioRender.com>

Una de las zeolitas más prometedoras para aplicaciones biológicas es la clinoptilolita. ($K_2Na_2Ca(Al_6Si_3O_{72}) \cdot 21H_2O$). Esta es la zeolita natural más común y se reconoció como especie mineral en 1932 por su similitud química con la modernita. Durante décadas se le confundió con heulandita ($NaCa_4(Al_9Si_27O_{72}) \cdot 24H_2O$), hasta que se comprobó que comparten la misma estructura cristalina, aunque con distinta composición (Grifasi et al., 2024).

La clinoptilolita posee una estructura laminar con cavidades que alojan moléculas de agua y cationes intercambiables. Esto le confiere una alta capacidad de intercambio iónico y permite su deshidratación térmica sin que su estructura se vea alterada. Su red tridimensional (figura 2) incluye canales de distintos tamaños, lo que define su capacidad para alojar o filtrar moléculas según su diámetro (Grifasi et al., 2024). Además, presenta una gran ventaja ante medios

ácidos, lo cual es especialmente relevante en los sistemas biológicos (Kraljević Pavelić et al., 2017).

Entre las propiedades más destacadas se encuentran su alta afinidad y capacidad de tamizaje molecular, adsorción de agua, remoción de iones de amonio y toxinas urémicas, así como su potencial como biosensor o como vehículo para transportar diversas moléculas (Kraljević Pavelić et al., 2017).

Gracias a estas características, se ha descrito que la clinoptilolita puede actuar como detoxificante, modulador del sistema inmunológico, inhibidor del crecimiento de algunos patógenos, regulador de la microbiota, coadyuvante en terapias antitumorales y en vacunas, además de servir como base para enzimas miméticas (Kraljević Pavelić et al., 2017).

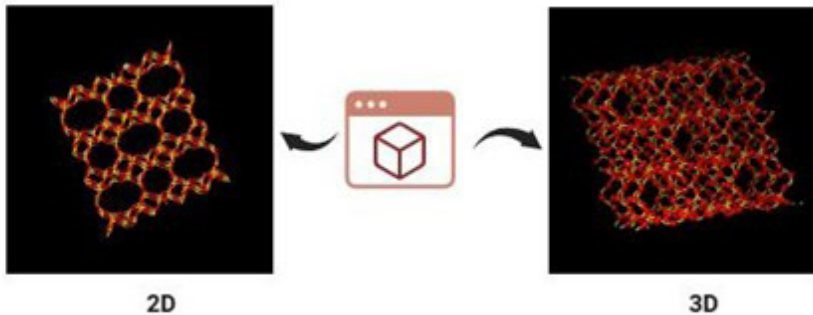


Figura 2. Representación 2D y 3D de la estructura de la clinoptilolita. Obtenido de Structure Commission of the International Zeolite Association. <https://america.iza-structure.org/>. Creado con BioRender <https://BioRender.com>

Aplicaciones clínicas y biomédicas de las zeolitas

Las zeolitas tienen una amplia variedad de aplicaciones en el ámbito médico y clínico, muchas de las cuales continúan en investigación (figura 3). Una de las más prometedoras es su uso en la liberación controlada de fármacos. Debido a su estructura porosa, las zeolitas pueden funcionar como base para desarrollar nanopartículas, capa-

ces de encapsular y administrar medicamentos o compuestos bioactivos. Entre las zeolitas más empleadas para este propósito, se encuentran la clinoptilolita y la faujasita (Pandya et al., 2024).

Tradicionalmente, se consideraba que los materiales inorgánicos no eran compatibles como

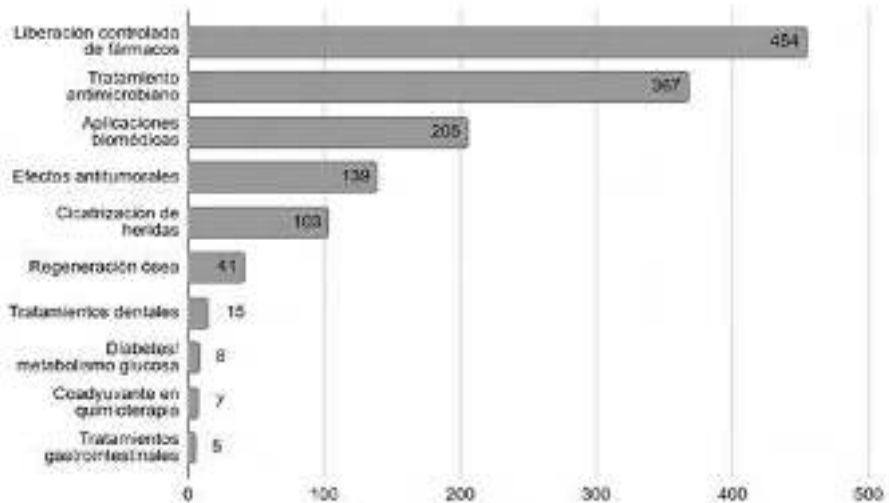


Figura 3. Estudios de aplicación de compuestos nanoestructurados de zeolitas con aplicaciones biomédicas

Nota: Elaboración propia. En la figura se representa la frecuencia absoluta de los estudios encontrados en una revisión sistemática con búsquedas de 2019-2024 en las bases de datos de Web of Science, Scopus y Pubmed. El proceso de cribado y selección de estudios se realizó con los lineamientos de la declaración PRISMA.

soportes o vehículos de fármacos, sin embargo, cuando las zeolitas se presentan en forma de nanoporos, ofrecen una gran superficie de contacto, lo que facilita la agregación y el transporte de diferentes moléculas terapéuticas (Derakhshankhah et al., 2020).

Gracias a estas propiedades, las zeolitas pueden funcionar como soporte de enzimas, anticuerpos y otros compuestos que requieren de una liberación lenta y sostenida para mejorar su eficacia. También permiten la creación de materiales híbridos, donde una matriz inorgánica sostiene compuestos orgánicos, favoreciendo así un mejor desempeño de los fármacos administrados (Hernández-Espinosa et al., 2024; Hao et al., 2021).

No obstante, para que las zeolitas sean consideradas nanosopores en sistemas biológicos, es fundamental evaluar su citotoxicidad, ya que algunos tipos pueden resultar peligrosos para la salud humana y animal. En particular, ciertas zeolitas fibrosas como la erionita, escolecita y ofretita, pueden alterar la organización celular y la función mitocondrial, lo que las convierte en potentes agentes cancerígenos. De la misma forma se han observado diferencias en cuanto a la toxicidad de las zeolitas en su forma micro-métrica y nanométrica (Hao et al., 2021).

En contraste, otras zeolitas muestran baja toxicidad, y por lo tanto, mayor potencial para aplicaciones biomédicas. Entre ellas se encuentra la clinoptilolita y algunas zeolitas sintéticas tipo ZIF, que se consideran más seguras para su uso en sistemas biológicos.

Aplicaciones de zeolitas en el control de la diabetes y del metabolismo de la glucosa

Las enfermedades crónicas no transmisibles (ECNT), como las enfermedades cardiovasculares, diversos tipos de cáncer, padecimientos respiratorios, diabetes, obesidad y algunos trastornos mentales, representan uno de los principales desafíos de la salud pública a nivel mundial (Budreviciute et al., 2020). Debido a su carácter crónico, requieren de tratamientos continuos basados en medicamentos, cambios en el estilo de vida y, cada vez más, en la innovación tecnológica para desarrollar nuevas terapias.

En el caso de la diabetes, el objetivo central del tratamiento es mantener bajo control el metabolismo de la glucosa, generalmente mediante fár-

macos y sustancias con efecto hipoglucemiante. Dentro de este campo, las zeolitas, y en particular la clinoptilolita, han comenzado a estudiarse por su papel complementario en la regulación de la glucosa. No obstante, la evidencia disponible hasta ahora proviene principalmente de estudios *in vitro* y ensayos preclínicos en modelos animales, por lo que aún no se puede considerar una aplicación clínica establecida.

En la tabla 1 se resumen algunos de los estudios más recientes que exploran el uso de zeolitas naturales y sintéticas en el control de la glucosa y otros parámetros metabólicos.

Tabla 1. Estudios con la aplicación de zeolitas naturales en el control de la glucosa o parámetros metabólicos

Autor y año	Tipo de estudio	Modelo	Tratamiento	Resultados principales
Omidi et al., (2019)	Estudio experimental preclínico del efecto de la clinoptilolita nanométrica natural (NCLN) y como comino negro <i>Nigella sativa</i> (NS).	Animal: Ratas diabéticas Vs Ratas no diabéticas	Suplementación de (NCLN), (NS) o su combinación, acompañada de una dieta rica en grasas Duración: 1 mes Efecto esperado: niveles de glucemia en ayuno y perfil de lípidos (TG, CT, C-LDL)	Reducción de la glucemia, sin efecto en el perfil de lípidos No hubo diferencias al combinar la zeolita con el comino negro, en comparación con la clinoptilolita sola.
Markoska et al., (2023)	Estudio <i>In vivo</i> e <i>In vitro</i> de las propiedades de adsorción de D-glucosa en interacción con zeolitas	<i>In vitro</i> : Modelo intestinal Animal: Ratones	<i>In vitro</i> : Se mezcló glucosa con clinoptilolita natural y tres zeolitas sintéticas. Medición de glucosa antes y después con técnicas avanzadas de análisis. <i>In vivo</i> : Se repitió el experimento administrando la mezcla en ratones vía oral Efecto esperado: absorción de glucosa a y sus niveles en sangre.	Adsorción de la glucosa y reducción en los niveles de sangre

<p>Kubo & Kawai (2021)</p>	<p>Estudio experimental pre-clínico sobre la seguridad de una zeolita natural (clinoptilolita y mordenita) en un modelo animal de diabetes tipo 2</p>	<p>Animal: Ratones diabéticos.</p>	<p>Administración de la mezcla de zeolitas disueltas en agua por vía oral, en dosis controladas</p> <p>Duración: 14 días</p> <p>Efecto esperado: niveles de glucemia, tolerancia oral a la glucosa, % HbA1c y lípidos en sangre y daño en órganos</p>	<p>Reducción de la glucosa, lípidos y %HbA1c</p> <p>No se encontraron daños en órganos de ratones tratados.</p>
---------------------------------------	---	------------------------------------	---	---

NOTA: Elaboración propia a partir de la información extraída de los estudios citados. Triglicéridos (TG). Colesterol Total (CT). Colesterol en Lipoproteínas de baja densidad (C-LDL). Hemoglobina glucosilada (HbA1c).

Aplicaciones de zeolitas en la cicatrización de heridas

Otra de las áreas más prometedoras para el uso de las zeolitas es en la ingeniería de tejidos y la medicina regenerativa. Gracias a su estructura nanoporosa, estos materiales pueden influir en el comportamiento de células y tejidos, modificando procesos de adhesión celular, la energía superficial y el microambiente necesario para favorecer la regeneración de los tejidos dañados (Zarrintaj et al., 2020).

La ingeniería tisular también abarca el desarrollo de materiales para la cicatrización de heridas, campo de gran relevancia clínica. Un caso particularmente desafiante es el de las úlceras por pie diabético, donde la herida se desarrolla en un microambiente alterado por la hiperglucemia, la falta de irrigación sanguínea, la hipoxia, la inflamación crónica, las infecciones persistentes

y las variaciones del pH (Hernández et al., 2021; Huang et al., 2023).

En los últimos años, la nanotecnología ha permitido crear sistemas de liberación controlada de fármacos que ayudan a enfrentar estos retos. Los nanosistemas pueden favorecer la cicatrización de heridas mediante dos vías principales (Huang et al., 2023):

1. La actividad química propia de los nanomateriales
2. La administración dirigida de compuestos antibióticos, antiinflamatorios, hipoglucemiantes, enzimas o incluso células madre

Zeolitas como agentes hemostáticos

Entre los mecanismos más estudiados está el efecto hemostático de ciertas zeolitas. Su alta higroscopicidad les permite detener el sangrado rápidamente al absorber agua y concentrar elementos sanguíneos. Además, pueden liberar Ca^{2+} , que intervienen en la activación de la cascada de coagulación (Yu & Zhong, 2021).

Estas propiedades han impulsado el desarrollo de materiales hemostáticos basados en zeolitas. Uno de los más conocidos es el QuickClot®,

elaborado con faujasita nanométrica intercambiada con calcio, que ha demostrado eficacia en modelos animales (Yu & Zhong, 2021). Aunque algunos materiales pueden generar calor excesivo y dañar tejidos, zeolitas como la clinoptilolita, la faujasita y la sepiolita han mostrado perfiles de seguridad favorables a heridas agudas (Jiang et al., 2023).

Evidencia reciente sobre zeolitas en cicatrización

En la tabla 2 se resumen los estudios más representativos sobre el uso de zeolitas naturales en la cicatrización de heridas. La mayoría corresponde a modelos preclínicos y

solo unos pocos han avanzado a ensayos clínicos fase I, como el estudio pionero realizado por Deinsberger et al., (2022).

Tabla 2. Estudios con la aplicación de zeolitas naturales en los procesos de cicatrización

Autor y año	Tipo de estudio	Modelo	Tratamiento	Resultados principales
Pamuk et al., (2025)	Estudio comparativo <i>In vivo</i> del efecto del bálsamo resinoso <i>Myroxylon pereirae</i> (MP), Fenitoína (F) o clinoptilolita (C)	Animal: Ratas con fistula faringocutánea	<p>Aplicación de tratamientos a cuatro grupos de ratas: tres recibieron un tratamiento (MP, F o C) y uno fue grupo control</p> <p>Duración: Al tercer día de crear la herida quirúrgica, se aplicaron los tratamientos</p> <p>Efecto esperado: Al décimo día se analizó la progresión de la herida: inflamación, formación de nuevos vasos sanguíneos, producción de colágeno y actividad de fibroblastos (células de reparación)</p>	<p>Efecto cicatrizante comparable a otros tratamientos.</p> <p>La clinoptilolita mostró efecto positivo por sí sola</p> <p>Se podría mejorar su efecto si actuará como vehículo de otro compuesto como antibiótico o un cicatrizante</p> <p>Reduce la producción de aminas biógenas</p>
Samadian et al., (2023)	Estudio <i>In vivo</i> de los efectos antibacteriano y regenerativo de un gel a base de clinoptilolita y alginato	Animal: Ratas con quemaduras	<p><i>Aplicación de tratamientos a tres grupos de ratas a las que se les indujo una quemadura: alginato, clinoptilolita + alginato, sin tratamiento especial.</i></p> <p>Duración: 7 y 14 días</p> <p>Efecto esperado: antibacteriano, compatibilidad con células sanguíneas, regeneración de células.</p>	<p>Mejoría en la inflamación y la regeneración.</p> <p>El compuesto no mostró efecto antibacteriano por sí solo</p> <p>Mejoró el proceso de inflamación</p> <p>No dañó las células sanguíneas</p> <p>Se sugiere la agregación de un antibiótico</p>
Deinsberger et al. (2022)	Ensayo clínico fase I Aplicación de un polvo de clinoptilolita purificada (TCP) en sujetos sanos para evaluar la cicatrización	Humano: 12 sujetos voluntarios	<p>Aplicación de tratamientos a dos grupos de sujetos a los que se les realizó una pequeña herida en la piel: uno al que se le aplicó solución salina y al otro TCP</p> <p>Duración: 29 días, con curación cada 2 días hasta el día 14. Revisión de la herida los días restantes</p> <p>Efecto esperado: Proceso de cicatrización (aparición de la herida, inflamación, infección)</p>	<p>Cicatrización normal en ambos grupos sin enrojecimiento, inflamación ni infección</p> <p>No se presentaron reacciones adversas en el grupo de TCP</p> <p>Se consideró que la aplicación del TCP fue seguro y bien tolerado</p>

(Jiang et al., 2023)	Estudio <i>In vitro</i> e <i>In vivo</i> de la aplicación de sepiolita con nanopartículas de plata (AgNPs) en el proceso de cicatrización	Animal: Ratas con incisión de vena caudal y conejos con incisión de vena femoral y carotídea	Aplicación de tratamientos a grupos de ratas y conejos: los que recibieron sepiolita+AgNPs con diferentes tratamientos o no. Duración: Inmediato a la realización de la herida y seguimiento hasta 12 días Efecto esperado: Tiempo de sangrado, cicatrización de la herida (síntesis de colágeno)	El compuesto de sepiolita+AgNPs detuvo el sangrado más rápido y estimula la cicatrización de heridas al estimular la síntesis de colágeno
----------------------	---	---	---	---

NOTA: Elaboración propia a partir de la información extraída de los estudios citados.

Posibles mecanismos beneficiosos

Diversas publicaciones sugieren que las zeolitas pueden ofrecer tratamiento de heridas complejas debido a:

- Su capacidad de absorción de aminos biógenas, responsables del mal olor en heridas crónicas;
- Su actividad microbiana cuando se combinan con nanopartículas de plata u otros compuestos bioactivos;
- Su contribución a la hemostasia, gracias a su rápida absorción de fluidos y la activación de la coagulación;
- Su posible papel como acarreadores de antibióticos o moléculas regenerativas, mejorando su liberación en el sitio de la herida.

En resumen, estos mecanismos convierten a las zeolitas, especialmente la clinoptilolita y ciertos compuestos híbridos, en candidatos atractivos para el diseño de apósitos avanzados y terapias regenerativas. Sin embargo, aún se requieren más estudios clínicos para confirmar su eficacia y seguridad en heridas crónicas y en poblaciones con comorbilidades complejas.

Conclusión

Las aplicaciones biomédicas de las zeolitas abarcan una amplia variedad de funciones, entre ellas su uso como acarreadores de sustancias, agentes antimicrobianos, materiales hemostáticos, y como componentes en tratamientos de regeneración de tejidos. Más recientemente, también se ha explorado su papel en el control de la glucosa. En este sentido, en el tratamiento de la diabetes, las zeolitas, particularmente la clinoptilolita debido a su perfil de seguridad, podría contribuir con el control de la glucemia mediante mecanismos de absorción y modulación metabólica. Asimismo, su potencial uso como apoyo en la cicatrización en úlceras por pie diabético ofrece una vía adicional para abordar complicaciones comunes de la enfermedad. No obstante, la mayoría de los estudios disponibles se han realizado en modelos experimentales *in vitro* e *in vivo*, y solo unos cuantos han demostrado su efectividad y seguridad en ensayos clínicos bien diseñados.

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 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

Agradezco a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo otorgado en el desarrollo del programa de Doctorado en Investigación y Educación para la Salud, beca No. 4052751

Referencias

- Budreviciute, A., Damiati, S., Sabir, D. K., Onder, K., Schuller-Goetzburg, P., Plakys, G., Katileviciute, A., Khoja, S., & Kodzius, R. (2020). Management and Prevention Strategies for Non-communicable Diseases (NCDs) and Their Risk Factors. *Frontiers in Public Health*, 8, 574111. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.574111>
- Deinsberger, J., Marquart, E., Nizet, S., Meisslitzer, C., Tschegg, C., Uspenska, K., Gouya, G., Niederdöckl, J., Freissmuth, M., Wolzt, M., & Weber, B. (2022). Topically administered purified clinoptilolite tuff for the treatment of cutaneous wounds: A prospective, randomised phase I clinical trial. *Wound Repair and Regeneration*, 30(2), 198–209. <https://doi.org/10.1111/wrr.12991>
- Derakhshankhah, H., Jafari, S., Sarvari, S., Barzegari, E., Moakedi, F., Ghorbani, M., Shiri Varnamkhasti, B., Jaymand, M., Izadi, Z., & Tayebi, L. (2020). Biomedical Applications of Zeolitic Nanoparticles, with an Emphasis on Medical Interventions. *International Journal of Nanomedicine*, Volume 15, 363–386. <https://doi.org/10.2147/IJN.S234573>
- Grifasi, N., Ziantoni, B., Fino, D., & Piumetti, M. (2024). Fundamental properties and sustainable applications of the natural zeolite clinoptilolite. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33656-5>
- Hao, J., Stavljениć Milašin, I., Batu Eken, Z., Mravak-Stipetic, M., Pavelić, K., & Ozer, F. (2021). Effects of Zeolite as a Drug Delivery System on Cancer Therapy: A Systematic Review. *Molecules*, 26(20), 6196. <https://doi.org/10.3390/molecules26206196>
- Hernández, M. A., Salgado, M. A., Portillo, R., Petranovskii, V., Hernández, G. I., Santamaria, D., & Rubio, E. (2021). Nanoparticles of ν -Sitoesterol and Ag on Clinoptilolite Zeolites. *Journal of Nanomaterials*, 2021, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2021/9959552>
- Hernández Espinosa, M. A., Hernández Salgado, G. I., Ignacio Portillo, R., Velasco, Ma. D. L. Á., Santamaria, J. D., & Montserrat, K. (2024). Materiales híbridos en ulceraciones de pie diabético: Nanoderma. *Materiales Avanzados*, 40, 148–153. <https://doi.org/10.22201/iim.ma.2024.40.42>
- Huang, F., Lu, X., Yang, Y., Yang, Y., Li, Y., Kuai, L., Li, B., Dong, H., & Shi, J. (2023). Microenvironment Based Diabetic Foot Ulcer Nanomedicine. *Advanced Science*, 10(2), 2203308. <https://doi.org/10.1002/adv.202203308>
- Jiang, Y., Yang, Y., Peng, Z., Li, Y., Peng, J., Zhang, Y., Jin, H., Tan, D., Tao, L., & Ding, Y. (2023). Sustainable sepiolite-based composites for fast clotting and wound healing. *Biomaterials Advances*, 149, 213402. <https://doi.org/10.1016/j.bioadv.2023.213402>
- Kraljević Pavelić, S., Micek, V., Filošević, A., Gumbarević, D., Žurga, P., Bulog, A., Orct, T., Yamamoto, Y., Preočanin, T., Plavec, J., Peter, R., Petradić, M., Vikić-Topić, D., & Pavelić, K. (2017). Novel, oxygenated clinoptilolite material efficiently removes aluminium from aluminium chloride-intoxicated rats in vivo. *Microporous and Mesoporous Materials*, 249, 146–156. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2017.04.062>
- Kubo, K., & Kawai, Y. (2021). Zeolite Improves High-Fat Diet-Induced Hyperglycemia, Hyperlipidemia and Obesity in Mice. *Journal of Nutritional Science and Vitaminology*, 67(5), 283–291. <https://doi.org/10.3177/insv.67.283>
- Markoska, R., Stojković, R., Filipović, M., Jurin, M., Špada, V., Kavre Piltaver, I., Pavelić, K., Marković, D., & Kraljević Pavelić, S. (2023). Study of zeolite clinoptilolite d-glucose adsorption properties in vitro and in vivo. *Chemico-Biological Interactions*, 382, 110641. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2023.110641>
- Omid, H., Khorram, S., Mesgari, M., Asghari-Jafarabadi, M., & Tarighat-Esfanjani, A. (2019). The effects of natural nano-sized clinoptilolite and Nigella sativa supplementation on blood glucose and lipid profile in rats with type 2 diabetes mellitus. *Progress in Nutrition*, 21(1-S), 147–153. <https://doi.org/10.23751/pn.v21i1-S.5833>
- Pamuk, E., Dogan, E., Kurtulan, O., Güler Tezel, Y. G., & Yiğit, A. A. (2025). Effects of Myroxylon pereirae , Phenytoin, and Clinoptilolite After Pharyngocutaneous Fistula: An Experimental Animal Model. *Otolaryngology–Head and Neck Surgery*, 172(5), 1656–1663. <https://doi.org/10.1002/ohn.1179>

- Pandya, T., Patel, S., Kulkarni, M., Singh, Y. R., Khodakiya, A., Bhattacharya, S., & Prajapati, B. G. (2024). Zeolite-based nanoparticles drug delivery systems in modern pharmaceutical research and environmental remediation. *Heliyon*, 10(16), e36417. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36417>
- Samadian, H., Vahidi, R., Salehi, M., HosseiniNave, H., Shahabi, A., Zanganeh, S., Lashkari, M., Kouhbananejad, S. M., Rezaei Kolarijani, N., Amini, S. M., AsadiShekaari, M., & MirzaeiParsa, M. J. (2023). Hydrogel nanocomposite based on alginate/zeolite for burn wound healing: In vitro and in vivo study. *Iranian Journal of Basic Medical Sciences*, 26(6). <https://doi.org/10.22038/ijbms.2023.68897.15016>
- Serati-Nouri, H., Jafari, A., Roshangar, L., Dadashpour, M., Pilehvar-Soltanahmadi, Y., & Zarghami, N. (2020). Biomedical applications of zeolite-based materials: A review. *Materials Science and Engineering: C*, 116, 111225. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.111225>
- Souza, I., García-Villén, F., Viseras, C., & Pergher, S. (2023). Zeolites as Ingredients of Medicinal Products. *Pharmaceutics*, 15(5), 1352. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15051352>
- Yu, P., & Zhong, W. (2021). Hemostatic materials in wound care. *Burns & Trauma*, 9, tkab019. <https://doi.org/10.1093/burnst/tkab019>
- Zarrintaj, P., Mahmodi, G., Manouchehri, S., Mashhadzadeh, A. H., Khodadadi, M., Servatan, M., Ganjali, M. R., Azambre, B., Kim, S., Ramsey, J. D., Habibzadeh, S., Saeb, M. R., & Mozafari, M. (2020). Zeolite in tissue engineering: Opportunities and challenges. *MedComm*, 1(1), 5–34. <https://doi.org/10.1002/mco2.5>

Recepción: 19.11.2025

Revisión: 30.12.2025

Publicación: 15.01.2026

<https://orcid.org/0009-0003-6859-7587>

<https://orcid.org/0000-0003-4392-7028>

<https://orcid.org/0009-0003-1371-7166>

DEL RESIDUO AL RECURSO: PLÁSTICOS BIODEGRADABLES Y ECONOMÍA CIRCULAR EN PUEBLA

TRANSFORMING WASTE INTO VALUE: BIODEGRADABLE PLASTICS AND THE CIRCULAR ECONOMY IN PUEBLA

Sandra Leticia Castillejos Mosqueda¹

Jorge Raúl Cerna Cortez²

Adrián Gustavo Badillo Morales³

¹Investigador por México-SECIHTI, Facultad de Ciencias Químicas, BUAP

²Laboratorio de Innovación y Materiales Avanzados-DITCo, BUAP

³Posgrado en Ciencias Químicas, BUAP

Correos:

sandra.castillejos@secihti.mx

jorge.cerna@correo.buap.mx

bm224470026@alm.buap.mx

Resumen

Los plásticos representan una gran importancia económica a nivel global y, en particular, en el estado de Puebla, donde el sector plástico constituye una parte significativa del PIB manufacturero. Sin embargo, en las últimas décadas su producción y consumo han aumentado de manera tan acelerada que han generado una grave problemática ambiental, debido a su acumulación en ecosistemas terrestres y marinos y la formación de microplásticos, estas diminutas partículas pueden encontrarse en el agua, suelo e incluso comida. Dado que los plásticos son parte importante de la economía y están involucrados en muchos sectores industriales, es imperativo idear alternativas sostenibles para continuar teniendo los mismos productos, pero sin afectar el medio ambiente. Entre las estrategias emergentes se encuentra el uso de biopolímeros integrados dentro de un esquema de economía circular, dentro de estos biopolímeros se encuentran el poli (ácido láctico) (PLA), un material derivado de biomasa con alto potencial para sustituir plásticos convencionales.

Palabras clave: biopolímeros, economía circular, polímeros biodegradables, PLA.

Abstract

Plastics play a crucial economic role worldwide, particularly in the Mexican state of Puebla, where the plastics industry accounts for a significant share of the manufacturing GDP. However, in recent decades, their production and consumption have increased so rapidly that plastic waste has become a serious environmental problem. Its accumulation in terrestrial and marine ecosystems accelerates the formation of microplastics, tiny plastic particles that can be found in water, soil and even food. Because plastics are deeply embedded in the economy and in many industrial sectors, it is essential to develop sustainable alternatives that maintain the benefits of plastic products while reducing their environmental impact. One promising strategy is the use of biopolymers within a circular economy framework, in which materials are designed to be reused, recycled or safely degraded. Among these materials, poly(lactic acid) (PLA)—a polymer derived from biomass—stands out for its high potential to replace conventional plastics in multiple applications.

Keywords: biopolymers, circular economy, biodegradable polymers, PLA.

Introducción

En el siglo XXI, los plásticos se han convertido en componentes fundamentales de la vida moderna, con aplicaciones que abarcan desde la construcción hasta los dispositivos médicos y el embalaje (Jiang et al., 2022). A nivel mundial, de acuerdo con datos de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), la producción de plásticos se duplicó entre 2000 y 2019, pasando de 234 a 460 millones de toneladas, y se prevé que estas cifras se cuadrupliquen hacia 2040 (Global Plastics Outlook, 2022).

En México, para 2024, la producción de resinas plásticas alcanzó aproximadamente 3,5 millones de toneladas, lo que contribuye con el 3,1 % del producto interno bruto manufacturero y genera más de un millón de empleos, evidenciando la importancia económica de este sector (Gobierno de México, 2025). Específicamente, el estado de Puebla se ubicó dentro de

las cuatro entidades más relevantes del sector plástico nacional, y se proyecta que para 2026 el PIB asociado a esta industria crezca alrededor de 3.6 % (Juan Carlos Natale, 2025).

Sin embargo, este incremento en la producción refleja también un uso descontrolado, que se traduce en problemas medioambientales graves: acumulación de residuos plásticos en medios terrestres y acuáticos (Ghaffari et al., 2025), formación de microplásticos (Sahandi et al., 2026) y emisiones de CO₂ asociadas a su producción (Shen et al., 2025). Un informe de la OCDE estima que para 2060 la cantidad de residuos plásticos se triplicará, y que casi dos tercios de ellos provendrán de productos de corta duración —como bolsas, envoltorios y empaques desechables— con una vida útil de apenas minutos u horas, pero capaces de persistir en el ambiente durante cientos de años (Al Khoeriyah & Sembiring, 2024).

¿Qué son los plásticos?

Los materiales plásticos se derivan de productos del petróleo y entre el 5% y el 8% de la producción mundial de petróleo se consume para producirlos. Los materiales plásticos son técnicamente hablando polímeros, los cuales son sustancias orgánicas compuestas de unidades estructurales que se repiten hasta alcanzar pesos moleculares elevados (Sahai et al., 2025). Principalmente se clasifican, por su comportamiento frente a la temperatura, en termoestables y termoplásticos. Los polímeros termoestables son aquellos que una vez moldeados, no pueden volver a fundirse ni deformarse, se dividen en epoxi, baquelita, poliéster, éster vinílico y urea-formaldehído, por el contrario, los termoplásticos son aquellos que pueden fundirse y moldearse repetidamente mediante el calor, existen seis tipos principales de termoplásticos: cloruro de polivinilo (PVC), polipropileno (PP), tereftalato de polietileno (PET), poliestireno (PS), polietileno de alta densidad (HDPE) y polietileno de baja densidad (LDPE) (Ncube et al., 2021)



Figura 1. Ejemplos de polímeros termoplásticos y termoestables. (Adaptación del sitio web: <https://openart.ai/video/i2v/sora-v2>)

Los materiales plásticos tienen numerosas aplicaciones, al ser versátiles, duraderos y ligeros, entre las que se incluyen el embalaje, la construcción, los dispositivos biomédicos, la aviación, los textiles, el mobiliario, la auto-

moción y la industria electrónica (Jiang et al., 2022; Ramli et al., 2024). El principal problema asociado a los plásticos es su elevada estabilidad química y resistencia a los procesos de degradación fisicoquímicos y biológicos. Esta alta estabilidad les permite mantenerse en el medio ambiente durante periodos prolongados, lo que contribuye a su acumulación y potencial impacto ecológico (Mihai et al., 2022).

Por ejemplo, la gestión inadecuada de residuos plásticos y su eliminación incorrecta, como tirarlos a la basura, provocan una acumulación excesiva en los ecosistemas acuáticos y terrestres. Además, ocasiona que los plásticos se vayan descomponiendo en partículas más pequeñas con el tiempo, mediante los procesos de fotodegradación y fragmentación mecánica, dando como resultado a la formación de microplásticos, los cuales contaminan el suelo, los cuerpos de agua e incluso el aire (Dimassi et al., 2022).

Los microplásticos son partículas con un tamaño alrededor de 5mm, que, debido a sus efectos negativos sobre el medio ambiente, se consideran posibles agentes del cambio climático global. Representan un grave riesgo para

la fauna silvestre por la capacidad de causarles daño o la muerte (Roman et al., 2022). Asimismo, los plásticos actúan como esponjas para otros contaminantes, como lo son los metales pesados y sustancias químicas nocivas que, al ser ingeridos por los animales, se pueden introducir fácilmente en la cadena alimenticia, llegando a los seres humanos y poniendo en riesgo la salud pública (Masud et al., 2023).

Ante esta problemática, el desarrollo de polímeros biobasados y biodegradables ha cobrado relevancia; estos están diseñados a partir de fuentes renovables y con una mayor susceptibilidad a la degradación en condiciones ambientales y controladas. El desarrollo de este tipo de polímeros busca reducir la dependencia de recursos fósiles y reducir los desechos asociados a los plásticos convencionales.

Bioplástico: biobasado vs. biodegradable

Para comprender el alcance de los bioplásticos, es necesario aclarar algunos conceptos fundamentales, como qué se entiende por polímeros biobasados y polímeros biodegradables, así como la relación entre ambos y el impacto positivo que pueden generar sobre el medio ambiente.



Figura 2. Riesgo a la salud por microplásticos, desarrollo de biopolímeros para la protección a la vida. (Adaptación del sitio web: <https://deevaid.ai/es/ai>)

El impulso hacia migrar al uso de bioplásticos se inscribe en el marco más amplio de la economía circular, la cual propone transformar los modelos de producción y consumo mediante la reducción de residuos, el aprovechamiento eficiente de los recursos y la prolongación del ciclo de vida de

los materiales. En este contexto, los polímeros biobasados y biodegradables no solo representan una innovación tecnológica, sino también una herramienta clave para avanzar hacia sistemas productivos más sostenibles y compatibles con los desafíos ambientales actuales.

Economía circular

Definida como el modelo de producción y consumo, esquema bajo el que se opera, en la actualidad, el uso de materiales se le conoce como economía lineal, este modelo opera a través de los principios de extraer, fabricar y desechar, en donde se extraen materiales para transformarlos en productos, después los productos son consumidos o usados una sola vez y posteriormente son descartados como desecho. Sin embargo, este esquema está siendo obsoleto ante los retos ambientales a los que nos enfrentamos, por lo que se está impulsando un cambio de estrategia, pasando ahora a la adopción de un método que represente un sistema económico diseñado para eliminar los residuos y garantizar el uso continuo de los recursos, al que se le llama economía circular.

En este modelo se crea valor mediante la producción y venta de los bienes y servicios, es decir, entre más se produzca, más valor se genera, se enfoca en extender el ciclo de vida de los productos, materiales y recursos mediante un diseño cuidadoso, es un modelo integral de producción, distribución y consumo de bienes, productos y servicios, orientado al rediseño y reincorporación de los mismos, para mantener en la economía el mayor tiempo posible el valor y vida útil de los materiales y los recursos asociados a ellos, y que de esta forma se prevenga o minimice la generación de residuos y la extracción de materia prima, reincorporándolos en procesos productivos cíclicos o biológicos, además de fomentar cambios de hábitos de producción y consumo (Tapia et al., 2021).

Dentro de este modelo los plásticos biodegradables, son de vital importancia, ya que empiezan a reemplazar de manera efectiva a los plásticos tradicionales junto con la economía lineal, ofreciendo una solución sostenible a los problemas ambientales. Los plásticos biodegradables se descomponen en compuestos naturales mediante la actividad microbiana, reduciendo el impacto en los ecosistemas y la salud humana (Rahman et al., 2023). Especialmente en los entornos marinos, donde la contaminación por plásticos es alarmante, esta capacidad proporciona una solución sostenible al creciente problema de los residuos plásticos.

En este contexto, surge la necesidad de optimizar y ampliar el uso de biomateriales como el PLA, este plástico biobasado y biodegradable, no solo contribuyen a la conservación de recursos finitos al utilizar materiales renovables, como almidones vegetales o productos de fermentación microbiana en su producción, sino también el aprovechamiento de PLA reciclado permite disminuir la dependencia de recursos vírgenes y contribuir a cerrar el ciclo de vida del material, alineándose con los principios de la economía circular.

Con respecto al reciclaje y revalorización de productos elaborados con el ácido poli láctico, se presentan diversas tecnologías como la despolimerización química, solvólisis, reciclaje mecánico (mecanoquímico), hidrólisis enzimática, fermentación, gasificación y enfoques hídricos, y abordan un tema crucial para los fabricantes de material plástico (Jannatiha & Gutiérrez, 2025).



Figura 3. Diagrama que presenta la propuesta de un sistema hidropónico adaptado a los conceptos de la bioeconomía y de la economía circular. Fuente: Chatterjee et al. (2025)

El auge de las impresoras 3D en los últimos años ha provocado un aumento considerable en la demanda de plásticos como materia prima entre los cuales destacan el polietileno tereftalato glicolizado (PETG), poliamida PA6/PA12 (Nylon) y el ácido poliláctico (PLA), siendo el PLA el más utilizado en la impresión 3D por su alta facilidad de extrusión, baja deformación y buena precisión y es utilizado para la fabricación de prototipos, piezas decorativas, modelos educativos entre otros. Y esto ha ocasionado que se genere grandes cantidades de residuos de impresiones de 3D provenientes

del PLA, de modo que se deben buscar estrategias innovadoras para tratar dichos residuos.

Debido a todo lo anterior, recientemente en el grupo de investigación del Centro Avanzado de Pruebas Analíticas No Destructivas, se ha comenzado a trabajar con membranas poliméricas base PLA/almidón, dónde el PLA se obtiene de residuos de impresión 3D y el almidón que se trabaja se obtiene de desechos de hueso de aguacate, incorporando ambos elementos en un esquema de economía circular, que permita reintegrarlos a la cadena de valor a través de

productos plásticos de un sólo uso, que una vez terminen su tiempo de vida puedan reintegrarse a la tierra y no generar más residuos sólidos ni microplásticos en el ambiente.

Conclusión

Los plásticos son esenciales para múltiples sectores industriales y constituyen un motor económico importante tanto para México como para el estado de Puebla. No obstante, el modelo lineal de producción, uso y desecho se ha vuelto insostenible frente a los desafíos ambientales actuales.

En este contexto, los bioplásticos surgen como alternativas sostenibles e innovadoras para disminuir la dependencia de recursos fósiles y mitigar la contaminación asociada a los polímeros convencionales. La transición hacia una economía circular se perfila como un elemento clave para cerrar ciclos de uso, reducir la generación de residuos y maximizar la eficiencia en el uso de recursos.

El PLA destaca como una de las alternativas más prometedoras, al ser un polímero biobasado, biodegradable y potencialmente reciclable, con capacidad para integrarse en esquemas de recuperación y revalorización de materiales. El trabajo desarrollado en el CAPAND —al utilizar residuos de PLA de impresión 3D y almidón obtenido de desechos de hueso de aguacate para la fabricación de membranas poliméricas biodegradables— ejemplifica este enfoque.

Esta propuesta demuestra la viabilidad técnica de reincorporar desechos orgánicos y poliméricos en nuevos productos y representa un avance concreto hacia la creación de materiales de un solo uso que puedan reintegrarse de manera segura al medio ambiente al término de su ciclo de vida. Los resultados y enfoques descritos fortalecen la visión de que la innovación en biopolímeros y la economía circular son rutas indispensables para enfrentar la crisis global de contaminación por plásticos y promover un futuro ambiental más responsable.

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 Centro Avanzado de Pruebas Analíticas no Destructivas por el espacio y los recursos proporcionados para el desarrollo de las investigaciones presentes.

Referencias

- Al Khoeriyah, Z. B., & Sembiring, E. (2024). Migration and accumulation patterns of plastic waste in the environment: A comprehensive simulation study. *Heliyon*, 10(16). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36502>
- Castillejos, S., Cerna, J., Meléndez, F., Castro, M. E., Aguilar, R., Márquez-Beltrán, C., & González, M. (2018). Bulk modification of poly(lactide) (PLA) via copolymerization with poly(propylene glycol) diglycidylether (PPGDGE). *Polymers*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/polym1011184>
- Dimassi, S. N., Hahladakis, J. N., Yahia, M. N. D., Ahmad, M. I., Sayadi, S., & Al-Ghouthi, M. A. (2022). Degradation-fragmentation of marine plastic waste and their environmental implications: A critical review. *Arabian Journal of Chemistry*, 15(11), 104262. <https://doi.org/10.1016/j.ARABJC.2022.104262>
- Ghaffari, P., van Bavel, B., Bambulyak, A., Johansen, N. E., & Safarov, E. (2025). River-to-sea plastic pollution: A pilot toolbox for the Caspian Sea. *Chemosphere*, 387, 144667. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144667>
- Global Plastics Outlook. (2022). *Global Plastics Outlook ECONOMIC DRIVERS, ENVIRONMENTAL IMPACTS AND POLICY OPTIONS*. OECD Publishing.
- Gobierno de México, S. de E. (2025, November 14). Puebla, Entidad Federativa. <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/geo/puebla-pu>
- Grand View Horizon. (2025, November 14). Tamaño y perspectivas del mercado de ácido poliláctico en México, 2023-2030. https://www.grandviewresearch.com/horizon/outlook/polylactic-acid-market/mexico?utm_source=chatgpt.com
- Jannatiha, N., & Gutiérrez, T. J. (2025). Recycling and revalorization of PLA and PHA-based food packaging waste: A review. *Sustainable Materials and Technologies*, 44, e01364. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2025.E01364>
- Jiang, D. H., Satoh, T., Tung, S. H., & Kuo, C. C. (2022). Sustainable Alternatives to Nondegradable Medical Plastics. In *ACS Sustainable Chemistry and Engineering* (Vol. 10, Issue 15, pp. 4792–4806). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c00160>
- Juan Carlos Natale. (2025, June 25). En el Estado de Puebla se proyecta que la Industria del Plástico tenga un crecimiento del 3.6 del PIB en el 2026: Juan Carlos Natale. <https://expoplásticos.mx/2026/en-el-estado-de-puebla-se-proyecta-que-la-industria-del-plastico-tenga-un-crecimiento-del-3-6-del- PIB-en-el-2026-juan-carlos-natale/>
- Khosravi, A., Fereidoon, A., Khorasani, M. M., Naderi, G., Ganjali, M. R., Zarrintaj, P., Saeb, M. R., & Gutiérrez, T. J. (2020). Soft and hard sections from cellulose-reinforced poly(lactic acid)-based food packaging films: A critical review. *Food Packaging and Shelf Life*, 23, 100429. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100429>
- Kushwaha, M., Shankar, S., Goel, D., Singh, S., Rahul, J., Rachna, K., & Singh, J. (2024). Microplastics pollution in the marine environment: A review of sources, impacts and mitigation. *Marine Pollution Bulletin*, 209, 117109. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.117109>
- Masud, R. I., Suman, K. H., Tasnim, S., Begum, M. S., Sikder, M. H., Uddin, M. J., & Haque, M. N. (2023). A review on enhanced microplastics derived from biomedical waste during the COVID-19 pandemic with its toxicity, health risks, and biomarkers. *Environmental Research*, 216, 114434. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114434>
- Mihai, F. C., Gündoğdu, S., Khan, F. R., Olivelli, A., Markley, L. A., & Van Emmerik, T. (2022). Plastic pollution in marine and freshwater environments: abundance, sources, and mitigation. *Emerging Contaminants in the Environment: Challenges and Sustainable Practices*, 241–274. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85160-2.00016-0>
- Ncube, L. K., Ude, A. U., Ogunmuyiwa, E. N., Zulkifli, R., & Beas, I. N. (2021). An overview of plastic waste generation and management in food packaging industries. *Recycling*, 6(1), 1–25. <https://doi.org/10.3390/recycling6010012>
- Rahman, M. N., Shozib, S. H., Akter, M. Y., Islam, A. R. M. T., Islam, M. S., Sohel, M. S., Kamaraj, C., Rakib, M. R. J., Idris, A. M., Sarker, A., & Malafaia, G. (2023). Microplastic as an invisible threat to the coral reefs: Sources, toxicity mechanisms, policy intervention, and the way forward. *Journal of Hazardous Materials*, 454, 131522. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131522>

- Ramli, A. H. M., Manaf, L. A., Zulkeflee, Z., & Andriyono, S. (2024). Advancing circular economy approaches in plastic waste management: A systematic literature review in developing economies. *Sustainable Production and Consumption*, 51, 420–431. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.08.018>
- Roman, L., Hardesty, B. D., & Schuyler, Q. (2022). A systematic review and risk matrix of plastic litter impacts on aquatic wildlife: A case study of the Mekong and Ganges River Basins. *Science of The Total Environment*, 843, 156858. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156858>
- Sahi, H., Aguilera del Real, A. M., Alcayde, A., Bueno, M. J. M., Wang, C., Hernando, M. D., & Fernández-Alba, A. R. (2025). Key insights into microplastic pollution in agricultural soils: A comprehensive review of worldwide trends, sources, distribution, characteristics and analytical approaches. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 185, 118176. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2025.118176>
- Sahandi, J., Sorgeloos, P., Tang, K. W., Jafaryan, H., Mai, K., & Zhang, W. (2026). Sea salt associated microplastics amplify pathogenic *Vibrio* and impair development in brine shrimp (*Artemia franciscana*). *Marine Pollution Bulletin*, 222, 118895. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.118895>
- Shen, Z., Jia, Z., Gao, L., Qin, L., Zhang, J., Sun, H., Qi, J., & Yin, J. (2025). CO₂-Enhanced methanolysis: A sustainable route for the depolymerization of PLA and PET-rich mixed plastic waste. *Process Safety and Environmental Protection*, 204, 108128. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.108128>
- Tapia, C., Bianchi, M., Pallaske, G., & Bassi, A. M. (2021). Towards a territorial definition of a circular economy: exploring the role of territorial factors in closed-loop systems. *European Planning Studies*, 29(8), 1438–1457. <https://doi.org/10.1080/09654313.2020.1867511>

Recepción: 15.11.2025

Revisión: 30.12.2025

Publicación: 15.01.2026

<https://orcid.org/0000-0002-9346-9291>

<https://orcid.org/0000-0002-0193-6519>

¿ES POSIBLE ESCAPAR DE LOS MICROPLÁSTICOS? EL RETO AMBIENTAL MÁS GRANDE DE NUESTRA ERA

IS IT POSSIBLE TO ESCAPE MICROPLASTICS? THE
BIGGEST ENVIRONMENTAL CHALLENGE OF OUR TIME

Caroline Itzel Pliego Cerdán ¹
Lidia Esmeralda García Díaz²

¹Doctorado en Ciencias Químicas, BUAP

²Centro de Química del Instituto de Ciencias, BUAP

Correos:

pc225570401@alm.buap.mx

esmeralda.garcia@correo.buap.mx

Resumen

Los plásticos se utilizan ampliamente por su bajo costo, durabilidad y versatilidad, y su producción ha aumentado de forma continua, lo que ha generado una gran cantidad de residuos que se acumulan. En el medio ambiente, se fragmentan en partículas más pequeñas llamadas microplásticos. Sin embargo, lo que parecía un problema ambiental lejano se ha convertido en una amenaza significativa para la salud humana: se han detectado microplásticos en la placenta y en la leche materna. Los microplásticos han ingresado en la cadena alimenticia debido a la contaminación del agua y del suelo, aumentando su concentración a medida que se avanza en la cadena trófica. El objetivo de esta contribución es evidenciar la problemática ambiental y de salud causada por los microplásticos, así como el reto que supone detectarlos en matrices ambientales y biológicas.

Palabras clave: Microplásticos, salud, medio ambiente, detección de microplásticos

Abstract

Plastics are widely used for their low cost, durability, and versatility; their production is increasing rapidly and generates substantial accumulated waste. In the environment, they fragment into smaller particles called microplastics. However, what seemed like a distant environmental problem has become a significant threat to human health: microplastics have been detected in the placenta and breast milk. Microplastics have entered the food chain via water and soil contamination, with concentrations increasing as they move up the trophic levels. The objective of this contribution is to highlight the environmental and health issues caused by microplastics and the challenge of detecting them in environmental and biological matrices.

Keywords: Microplastics, health, environment, microplastics detection

Introducción

Si observamos a nuestro alrededor, veremos que la mayoría de los objetos que utilizamos en nuestro día a día están fabricados en plástico. Desde envases de alimentos, cosméticos o productos farmacéuticos, recubrimientos de cables, piezas mecánicas e incluso textiles (Figura 1).

Esta versatilidad, aunada a su alta durabilidad y bajo costo, ha posicionado a los plásticos

como los materiales más producidos a nivel mundial. En 2023 se produjeron 413.8 millones de toneladas; sin embargo, la falta de gestión de los plásticos desechados y la ausencia de regulaciones han generado una acumulación de millones de toneladas de residuos plásticos en el medio ambiente. Consecuentemente, se han generado partículas de microplásticos (MP) que impactan al medio ambiente y a la salud humana (Plastics Europe AISBL, 2024).



Figura 1. Plásticos más comunes y sus aplicaciones (Elaboración propia)

Plásticos en el comienzo de la vida

En los últimos años, la presencia de MP en nuestro entorno ha dejado de ser un problema invisible. Diversos estudios han reportado su detección en matrices ambientales, alimentos y bebidas, en organismos vivos y en muestras biológicas humanas, con potencial toxicidad y efectos perjudiciales al medio ambiente, a los ecosistemas y a la salud.

Los MP pueden ingresar al organismo por tres vías: digestiva, inhalatoria y cutánea. En la vía digestiva (Figura 2), los MP presentes en los alimentos y bebidas recorren el esófago y llegan al estómago, donde permanecen entre 2 y 6 horas durante la digestión. Ahora se sabe que los MP insolubles y de tamaño inferior a $1.09 \mu\text{m}$ pueden atravesar el revestimiento epitelial del intestino,

acceder al sistema circulatorio y distribuirse a distintos órganos (Prathipa et al., 2024).

Se han detectado partículas de MP en el corazón, hígado y riñones; sin embargo, lo que genera más preocupación es su presencia en la placenta, el órgano encargado de nutrir y proteger al feto durante el embarazo.



Figura 2. Esquema del recorrido y distribución de microplásticos en el organismo humano (Elaboración propia)

Por otro lado, recientemente se ha reportado la presencia de MP en la leche materna, el alimento por excelencia en la primera etapa de la vida. Ahora se sabe que, desde la ges-

tación hasta la lactancia, los MP pueden atravesar barreras biológicas, como la placenta y las glándulas mamarias, y llegar al feto y al recién nacido (Jochum et al., 2025).

¿Cómo se generan los microplásticos y por qué están en todas partes?

Los residuos plásticos en el medio ambiente se fragmentan por ablación y exposición a la radiación ultravioleta, principalmente. Se descomponen en partículas más pequeñas, conocidas como MP, con un diámetro de hasta 5 mm, que se dispersan en el medio ambiente. En el medio acuoso se sedimentan y son ingeridos por animales acuáticos.

Por otro lado, en los campos agrícolas, los MP se acumulan y pueden ser absorbidos por las plantas. De tal manera, los MP son transferidos a la cadena alimentaria a todos los niveles, como se muestra en la Figura 3 (Ghosh et al., 2023; Yang et al., 2021).

A los fragmentos de polímeros resultantes de la ablación y degradación de plásticos de mayor tamaño (5 mm) se les conoce como MP secundarios, pues se generan a partir de un material polimérico preexistente. Por otro lado, existen MP que se producen para la fabricación



Figura 3. Generación, transporte e ingestión de microplásticos en el medio ambiente (Elaboración propia)

de cosméticos y productos de cuidado personal, o bien se producen como reactivos sintéticos industriales y se denominan MP primarios (de Bruin et al., 2022).

Los MP también pueden ingresar al organismo al ser inhalados en el polvo y por vía cutánea, a través de productos de cuidado personal, como las cremas o los exfoliantes que los contienen.

Impacto invisible: los efectos de los microplásticos en la salud humana

Es una preocupación creciente la bioacumulación de los MP en el organismo y sus efectos asociados, como la inflamación crónica y el estrés oxidativo, que dañan células y tejidos por exposición crónica. Aunado a esto, los plásticos contienen aditivos, tales como plastificantes, colorantes, antioxidantes, con su respectivo riesgo toxicológico. Los aditivos de los MP aumentan el riesgo de desarrollar cáncer, afectan el desarrollo fetal y pueden provocar un parto prematuro (Prathipa et al., 2024).

Por ejemplo, el bisfenol A (BPA) es un monómero empleado en la fabricación de plásticos de policarbonato y resinas epoxi, que comúnmente

se usan para envases de alimentos, bebidas, recubrimientos de latas e incluso biberones para bebés. Sin embargo, bajo condiciones de calor, acidez o desgaste, los enlaces del polímero pueden romperse y propiciar la migración del BPA hacia alimentos o bebidas en contacto con el material de plástico (Mandel et al., 2019; Maragou et al., 2008).

En los biberones de policarbonato se acelera la migración de moléculas de BPA (Figura 4), durante la esterilización en agua hirviendo, en esterilizadores con vapor o al calentarlos en el microondas. Esta exposición temprana genera problemas en el desarrollo neurológico y en el sistema endocrino de los bebés (Costa & Cairrao, 2024; Maragou et al., 2008).

Actualmente, el uso de BPA no está completamente prohibido, pero sí está limitado a quienes tienen contacto con alimentos, especialmente en envases para lactantes y artículos similares (Mandel et al., 2019). Otros aditivos prohibidos en este tipo de productos son los ftalatos, algunos colorantes, plomo, cadmio y estireno, pues su migración puede provocarse por efecto de la temperatura, del tiempo de contacto y de la composición del alimento (Gupta et al., 2024).



Figura 4. Diagrama de la migración de BPA a partir de un biberón de policarbonato (Elaboración propia)

Contaminación persistente: los efectos ambientales de los microplásticos

Los MP en ecosistemas terrestres y acuáticos representan una amenaza debido a su alta persistencia y movilidad. Los suelos son más vulnerables a la contaminación por plásticos que el mar, dado que la liberación de plásticos en el suelo es de 3 a 4 veces mayor que en los océanos. Los MP causan cambios en las propiedades físicas del suelo, perjudican el desarrollo de cultivos, así como la germinación, crecimiento y fotosíntesis de las plantas (Jiang et al., 2025).

En los ecosistemas acuáticos se observa con mayor frecuencia la biomagnificación de los MP, lo que aumenta su concentración a medida que se avanza en la cadena trófica.

Se ha reportado que su ingestión puede causar estrés fisiológico, alteraciones del metabolismo y del comportamiento, problemas reproductivos, daño intestinal y mortalidad en distintas especies. Por lo tanto, es

evidente el potencial impacto ecológico de los MP sobre la biodiversidad y equilibrio de los ecosistemas (Jiang et al., 2025).

Rastreado lo invisible: las técnicas analíticas para detectar los microplásticos

El análisis cualitativo y cuantitativo de MP es desafiante; la sensibilidad de las técnicas analíticas depende del tamaño de partícula analizado. En la Figura 5 se muestra la aplicabilidad de diversas técnicas analíticas, en relación con el intervalo de tamaño de partículas de los MP (Navarathna et al., 2023).

En general, la principal limitación en el análisis de los MP es su identificación en matrices como el suelo, el agua y las muestras biológicas, entre otras, lo que dificulta su monitoreo (Saha et al., 2024). A medida que disminuye el tamaño de los MP, se requieren técnicas más sensibles para identificarlos con precisión y confianza en diversas matrices. La Tabla 1 compila diversas

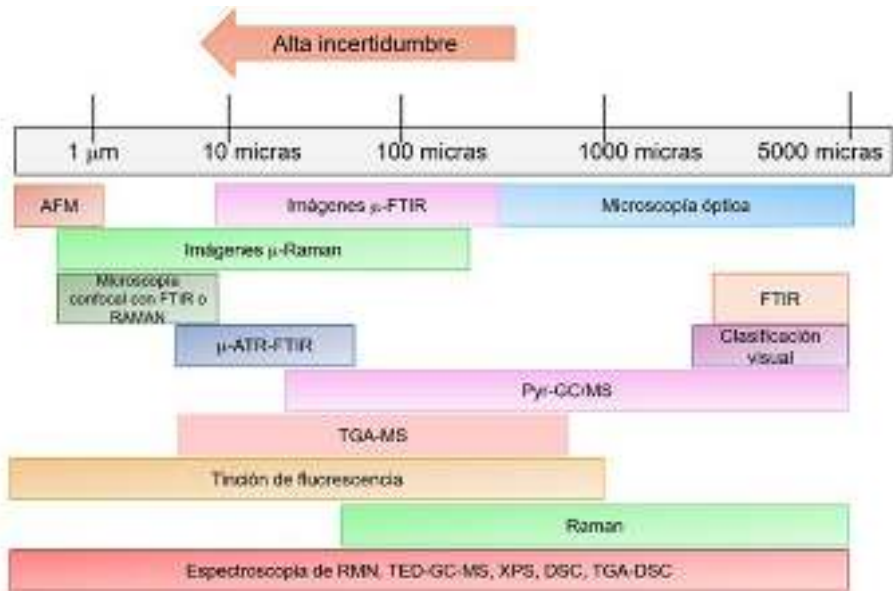


Figura 5. Resumen de técnicas de análisis de microplásticos ((Navarathna et al., 2023))

técnicas analíticas empleadas en la detección de microplásticos, así como sus ventajas y limitaciones (Ghosh et al., 2023; Li et al., 2018; Yadav et al., 2025).

En este contexto, en el Laboratorio de Absorción y Cromatografía de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, se desarrolla una investigación orientada a la detección de MP en matrices ambientales mediante cromatografía de gases con detector de masas, una técnica prometedora pero poco explorada en la identificación de MP en matrices ambientales. El trabajo de investigación lo lleva a cabo la Mtra. Caroline Itzel Pliego Cerdán, bajo la dirección de la Dra. Lidia Esmeralda García Díaz.

Negociando el futuro del plástico, ¿puede el mundo ponerse de acuerdo?

Poner punto final a la contaminación por plásticos es urgente para proteger la salud humana y el bienestar de las futuras generaciones. Sin embargo, las políticas, regulaciones e iniciativas industriales son escasas e insuficientes, y se estima que la producción y desechos plásticos se triplicarán en 2060 (Deeney et al., 2025). El Tratado Mundial del Plástico, consolidado en el año 2022, busca controlar la contaminación de todo el ciclo de vida de los plásticos, desde su fabricación, uso y hasta la gestión de residuos, promoviendo la reutilización (Bowyer, 2025; Farrelly et al., 2025). El tratado es respaldado por la ONU e

Tabla 1. Técnicas analíticas comúnmente utilizadas para la detección de microplásticos

Técnica Analítica	Tamaño Detectable	Ventajas	Limitaciones	Principio
Microscopía Óptica	>500 μm	Identificación rápida de microplásticos, análisis visual de forma y tamaño	No permite determinar la composición química, limitado a partículas de gran tamaño, subjetividad del observador	Iluminación ligera
Microscopía de fuerza atómica (AFM)	50-100 nm	Imágenes espaciales de polímeros a nano y microescala. Alta sensibilidad y resolución.	Superficie dañada de la muestra por el contacto físico	Barrido horizontal de muestras aplicando una fuerza persistente
Espectroscopia Raman	<20 μm	Alta sensibilidad y resolución, no destructivo, reduce problema de interferencias, no requiere preparación de la muestra	Señales débiles, interferencias importantes por impurezas, se requiere parámetros adecuados (potencia de láser y longitud de onda) para la obtención de espectros	Identificación molecular mediante dispersión inducida por láser
Pirólisis-Cromatografía de Gases-Espectrometría de Masas (Pyr-GC-MS)	>500 μm	Identificación precisa de polímeros, alta sensibilidad, análisis cuantitativo sensible.	Altos requerimientos de pretratamiento, restringido a detección partículas pequeñas, largo tiempo de análisis	Separación e identificación de microplásticos basados en pirólisis
Extracción y Desorción Térmica - Cromatografía de Gases - Espectrometría de Masas (TED-GC-MS)	<135 pg	Eficiente, grandes cantidades de muestras complejas pueden ser analizadas, alta sensibilidad	Análisis destructivo	Descomposición volátil de compuestos

integrado por representantes de los países, observadores científicos y agencias internacionales, con el fin de alinear las decisiones legales con la evidencia científica (Farrelly et al., 2025). Sin embargo, aún existe un fuerte desacuerdo en cuanto al establecimiento de

límites de producción y la responsabilidad extendida de los países productores de plásticos (Bowyer, 2025; Farrelly et al., 2025). La línea de tiempo del proceso para mitigar la contaminación por plásticos a nivel mundial se muestra en la Figura 6.

Conclusión

La contaminación por microplásticos es un desafío ambiental de los más grandes de la humanidad, dado que se han difundido por el agua, el suelo y el aire de todo el planeta. Su composición química y persistencia constituyen una amenaza para la salud humana y de diversas especies, una vez que entran en la cadena alimenticia, pues su propagación se

extiende. La identificación y cuantificación de los microplásticos en el medio ambiente y en los organismos vivos es un reto importante para su monitoreo y control, por tanto, es relevante seguir desarrollando metodologías de análisis que permitan detectarlos en matrices ambientales y biológicas.



Figura 6. Evolución del proceso legal para abordar la contaminación por plásticos a nivel mundial (Elaboración propia)

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 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 a la Revista Digital Internacional de Divulgación Científica del Instituto de Ciencias por dar a conocer las diversas temáticas que deben ser conocidas por los lectores.

Referencias

- Bowyer, C. (2025). INC-5.2 presents a critical opportunity to protect the health of current and future generations. *Cambridge Prisms: Plastics*, 3. <https://doi.org/10.1017/plc.2025.10015>
- Costa, H. E., & Cairrao, E. (2024). Effect of bisphenol A on the neurological system: a review update. In *Archives of Toxicology* (Vol. 98, Issue 1, pp. 1–73). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s00204-023-03614-0>
- de Bruin, C. R., de Rijke, E., van Wezel, A. P., & Astefanei, A. (2022). Methodologies to characterize, identify and quantify nano- and sub-micron sized plastics in relevant media for human exposure: a critical review. In *Environmental Science: Advances* (Vol. 1, Issue 3, pp. 238–258). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d1va00024a>
- Deeney, M., Yates, J., Kadiyala, S., Cousin, X., Dignac, M. F., Wang, M., Farrelly, T., & Green, R. (2025). Human health evidence in the global treaty to end plastic pollution: a survey of policy perspectives. *Cambridge Prisms: Plastics*, 3. <https://doi.org/10.1017/plc.2025.5>
- Farrelly, T., Brander, S., Thompson, R., & Carney Almroth, B. (2025). Independent science key to breaking stalemates in global plastics treaty negotiations. In *Cambridge Prisms: Plastics* (Vol. 3). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/plc.2025.2>
- Ghosh, S., Sinha, J. K., Ghosh, S., Vashisth, K., Han, S., & Bhaskar, R. (2023). Microplastics as an Emerging Threat to the Global Environment and Human Health. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 15, Issue 14). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/su151410821>
- Gupta, R. K., Pipliya, S., Karunanithi, S., Eswaran U, G. M., Kumar, S., Mandliya, S., Srivastav, P. P., Suthar, T., Shaikh, A. M., Harsányi, E., & Kovács, B. (2024). Migration of Chemical Compounds from Packaging Materials into Packaged Foods: Interaction, Mechanism, Assessment, and Regulations. In *Foods* (Vol. 13, Issue 19). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/foods13193125>
- Jiang, W., Yan, X., & Lv, Y. (2025). A critical review on the migration, transformation, sampling, analysis and environmental effects of microplastics in the environment. In *Journal of Environmental Sciences (China)* (Vol. 154, pp. 645–664). Chinese Academy of Sciences. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2024.05.018>
- Jochum#, M., Garcia#, M., Hammerquist, A., Howell, J., Stanford, M., Liu, R., Olewine, M., Hayek, E. El, Phan, E., Showalter, L., Shope, C., Suter, M., Campen, M., Aagaard, K., & Barrozo, E. (2025). Elevated Micro- and Nanoplastics Detected in Preterm Human Placentae. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5903715/v1>
- Li, J., Liu, H., & Paul Chen, J. (2018). Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection. In *Water Research* (Vol. 137, pp. 362–374). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.056>
- Mandel, N. D., Gamboa-Loira, B., Cebrián, M. E., Mérida-Ortega, Á., & López-Carrillo, L. (2019). Challenges to regulate products containing bisphenol A: Implications for policy. *Salud Publica de Mexico*, 61(5), 692–697. <https://doi.org/10.21149/10411>
- Maragou, N. C., Makri, A. A., Lampi, E., Thomaidis, N. S., & Koupparis, M. A. (2008). Migration of bisphenol A from polycarbonate baby bottles under real use conditions. *Food Additives and Contaminants - Part A*, 25(3), 373–383. <https://doi.org/10.1080/02652030701509998>
- Navarathna, C. M., Pray, H., Rodrigo, P. M., Arwenyo, B., McNeely, C., Reynolds, H., Hampton, N., Lape, K., Roman, K., Heath, M., Stokes, S., Gunatilake, S. R., Ariunbold, G., Perez, F., Thirumalai, R. V. K. G., Hassan, E. B., Elsayed, I., Mohan, D., Brown, A., ... Misna, T. E. (2023). Microplastics and Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) Analysis in Sea Turtles and Bottlenose Dolphins along Mississippi's Coast. *Analytica*, 4(1), 12–26. <https://doi.org/10.3390/analytica4010003>
- Plastics Europe AISBL. (2024). *Plastics – the fast Facts 2024*.

- Prathipa, R., Gopalakrishnan, N. K., Chaudhary, A., & Pappuswamy, M. (2024). Impact of Microplastics on Human Health: A Comprehensive Review. *Journal of Preventive, Diagnostic and Treatment Strategies in Medicine*, 3(2), 76–84. https://doi.org/10.4103/jpdtsm.jpdtsm_24_24
- Yadav, B., Gupta, P., Kumar, V., Umesh, M., Sharma, D., Thomas, J., & Kumar Bhagat, S. (2025). Potential health, environmental implication of microplastics: A review on its detection. *Journal of Contaminant Hydrology*, 268. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2024.104467>
- Yang, L., Zhang, Y., Kang, S., Wang, Z., & Wu, C. (2021). Microplastics in soil: A review on methods, occurrence, sources, and potential risk. In *Science of the Total Environment* (Vol. 780). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146546>

RECEPCIÓN: 18.11.2025

REVISIÓN: 30.12.2025

PUBLICACION: 15.01.2026

<https://orcid.org/0009-0008-5263-6330>

<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>

LAS PLANTAS: UNA OPORTUNIDAD DE TRATAMIENTO PARA LA MALARIA

PLANTS: A TREATMENT OPPORTUNITY FOR MALARIA

Estefanía del Alba Lizama García¹

María Eugenia Castro^{2*}

Norma A. Caballero³

Thomas Scior⁴

Francisco J. Melendez⁵

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

²Centro de Química del Instituto de Ciencias,
ICUAP, BUAP, 72570, Puebla, México

³Facultad de Ciencias Biológicas,
BUAP, 72570, México

⁴Laboratorio de Simulaciones Moleculares Computacionales,
Facultad de Ciencias Químicas, BUAP, 72570, Puebla México

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

Correos:

lg224470029@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 malaria o paludismo es una enfermedad conocida desde la antigüedad y ha sido la causante de miles de muertes alrededor del mundo hasta el día de hoy. Ésta es transmitida al ser humano por la picadura de mosquitos infectados por el parásito *Plasmodium*. Se han establecido diversos tratamientos para tratar a la malaria, sin embargo, en la actualidad el parásito ha desarrollado resistencia a diversos fármacos, por consiguiente, se han buscado alternativas para combatir a esta enfermedad, por lo que diversos investigadores han centrado sus estudios en fitofármacos con actividad antimalárica. En este artículo se describe de manera general cómo actúa el parásito en el cuerpo humano, sus síntomas, su historia y los tratamientos para la malaria. Además, se destacan los fitoquímicos, así como las plantas que los contienen y que son usadas como tratamiento naturista de esta enfermedad.

Palabras clave: Malaria, *Plasmodium*, fitoquímicos, actividad antimalárica.

Abstract

Malaria is a disease that has been known since ancient times and has caused thousands of deaths around the world to this day. It is transmitted to humans by the bite of mosquitoes infected with the *Plasmodium* parasite. Various treatments have been established to treat malaria; however, the parasite has now developed resistance to various drugs. Therefore, alternative approaches to combat this disease have been sought, and many researchers have focused their studies on phytopharmaceuticals with antimalarial activity. This article provides a general description of how the parasite acts in the human body, its symptoms, its history, and the current treatments for malaria. In addition, it highlights phytochemicals, as well as the plants that contain them, which are used as natural treatments for this disease.

Keywords: Malaria, *Plasmodium*, phytochemicals, antimalarial activity.

Introducción

Malaria

La malaria, conocida también como paludismo, es una enfermedad mortal, que en la mayoría de los casos se transmite por la picadura de mosquitos hembra del género *Anopheles* (Imagen 1), infectadas por el parásito *Plasmodium*, aunque existen otros medios de transmisión menos frecuentes (transfusiones sanguíneas o agujas contaminadas). Esta enfermedad se puede curar con un tratamiento adecuado.



Imagen 1. Mosquito hembra del género *Anopheles* (The Editors of Encyclopaedia Britannica, s/f).

Existen cinco especies de *Plasmodium* causantes de malaria en el ser humano, y dependiendo del agente causal son los síntomas que muestra el paciente.

Plasmodium falciparum es el más mortífero y, cuando la malaria es grave, los síntomas incluyen coma (malaria cerebral), hiperpirexia, convulsiones, hipoglucemia, anemia grave, edema pulmonar agudo, lesión renal aguda, hemorragia espontánea y coagulopatía, acidosis metabólica y coma. *P. vivax* es el más común fuera de África Subsahariana y se considera benigna, sin embargo, puede llegar a ocasionar una malaria grave, los síntomas que presenta son anemia grave, trombocitopenia, edema pulmonar agudo y, con menos frecuencia, malaria cerebral, pancitopenia, ictericia, rotura esplénica, hemoglobinuria, insuficiencia renal aguda y coma. Las especies *P. malariae* y *P. ovale*, son menos comunes. Por otra parte, *P. knowlesi* es un parásito que normalmente infecta a los simios, pero en ocasiones puede transmitirse a los humanos, causando malaria en zonas boscosas del sudeste asiático y la India (Organización Panamericana de la Salud & Organización Panamericana de la Salud, 2023). En la Figura 1 se muestra la distribución de las especies de *Plasmodium* reportadas a nivel mundial de acuerdo con los casos de origen local.



Figura 1. Mapa con la distribución de la identificación de casos causados por las especies de *P. falciparum*, *P. vivax*, casos mixtos y especie desconocida que predominan en los países con casos autóctonos del año 2023 (WHO, 2024).

Estadísticas a nivel mundial y en México

En el año 2023, la OMS reportó que hubo 263 millones de casos en 93 países y alrededor de 597,000 muertes en 83 de ellos. El continente africano es la región más afectada con el 94 % de los casos totales con un 95 % de las muertes, de las cuales el 76 % fueron niños menores de 5 años (OMS, 2024).

Aunque esta enfermedad se encuentra en proceso de eliminación en México, en 2024 se registraron 576 de casos importados, (adquirido de países en donde es endémico) en 22 Estados

(Figura 2), lo que representó un incremento del 92.6% de casos en comparación con lo reportado en 2023, causados por tres especies del parásito: *P. vivax*, *P. falciparum* y *P. ovale*. (Secretaría de Salud, 2025).

Con respecto a los casos autóctonos, se registraron 260 casos en el año 2024 causados por *P. vivax* con respecto a 44 casos del 2023 en las entidades de Chiapas, Oaxaca, Campeche y Chihuahua, como se puede apreciar en la Figura 3 (Secretaría de Salud, 2025).



Figura 2. Mapa de México en donde se señalan con distintas tonalidades de verde los Estados con casos importados en 2024 (Secretaría de Salud, 2025).



Figura 3. Estados de México con casos autóctonos confirmados por Plasmodium vivax en 2024 (Secretaría de Salud, 2025).

Ciclo vital del parásito

El ciclo de vida de *Plasmodium falciparum* involucra dos etapas de vida asexual dentro del huésped humano y una etapa sexual dentro del mosquito vector, es decir, de los mosquitos que contienen y transmiten el parásito al ser humano (Salinas et al., 2019) (Figura 4).

Todo comienza cuando el mosquito *Anopheles* (Imagen 1) pica al humano y se inyectan los **esporozoitos**, que son la forma inicial del parásito, desplazándose por el torrente san-

guíneo hasta llegar al hígado para infectar sus células (**hepatocitos**), dando comienzo a la primera etapa denominada **ciclo exoeritrocítico** (esquizogonia) (Kingston & Cassera, 2022), en donde el parásito pasa por varias etapas de desarrollo que concluyen con la formación de miles de **merozoítos**, que son la forma del parásito extracelular más pequeña, los cuales serán liberados de los **hepatocitos** para adherirse e invadir a los **eritrocitos** (glóbulos rojos), y dar inicio a la **etapa sanguínea** (Salinas et al., 2019).

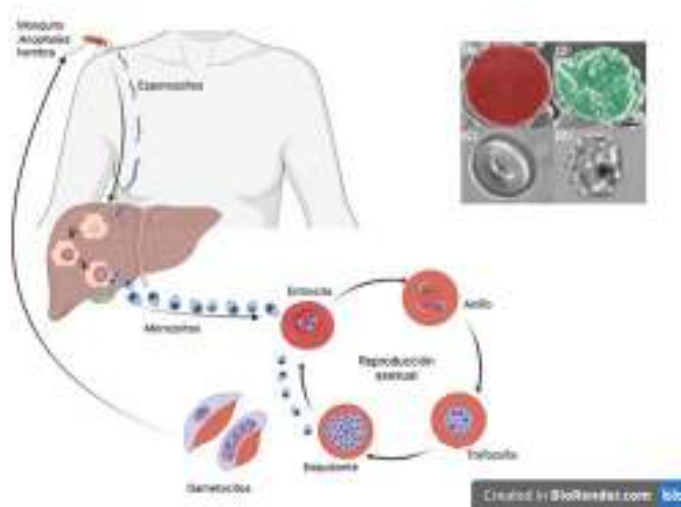


Figura 4. Ciclo de vida de *P. falciparum* (A y C) Eritrocito no infectado, (B y D) eritrocito infectado con el parásito *P. falciparum*. (Tilley et al., 2011) Creada en <https://BioRender.com>

Después de la invasión, se da inicio a la segunda etapa asexual dentro de la vacuola parasitífera, que es como una cápsula que el parásito crea para vivir dentro del eritrocito sin ser destruido, se conoce como **esquizogonia intraeritrocítica** o ciclo de vida eritrocítico asexual y se repite en ciclos que duran alrededor de 48 horas. Se lleva a cabo en cuatro etapas clasificadas en **anillo**, **trofozoito**, **esquizonte** y termina con la **ruptura de la célula** en donde se liberan los **merozoítos** hijos, éstos invaden a otros **eritrocitos**,

prolongando la etapa sanguínea. Este ciclo de constante invasión es el responsable de los síntomas de la malaria, como anemia, fatiga y fiebre. Durante la etapa sanguínea, un pequeño porcentaje de **merozoítos** se convierten en **gametocitos** y se mantienen en la sangre hasta que son absorbidos por un mosquito hembra del género *Anopheles*, iniciando la única etapa sexual del ciclo de vida dentro del mosquito (Salinas et al., 2019; Kingston & Cassera, 2022)

Fármacos usados contra la malaria

Los medicamentos empleados no se han mantenido totalmente vigentes a lo largo del tiempo debido a la resistencia desarrollada por el parásito o a la aparición de efectos secundarios. En la Figura 5 se muestran las estructuras químicas de los compuestos que han sido más utilizados en el tratamiento de la malaria.

Entre ellos, la **cloroquina** se continúa usando (Figura 5), ya que está recomendada para la especie *P.vivax*, siempre y cuando el parásito sea aún sensible al medicamento. La **primaquina** (Figura 5) se utiliza para prevenir recaídas por los parásitos *P.vivax* y *P. ovale* (OMS, 2024).



Figura 5. Estructuras químicas de fármacos antimaláricos más utilizados (Modificada de Tse et al., 2019).ceptos de la bioeconomía y de la economía circular. Fuente: Chatterjee et al. (2025)

Plantas medicinales de México para el tratamiento de la malaria

En México, la medicina tradicional, que es el uso de plantas medicinales, ha sido de gran apoyo para el tratamiento de diversas enfermedades, incluida la malaria, por lo que se tiene un registro de diversas plantas que ayudan a tratar a esta enfermedad (Tabla 1) (Aguilar Contreras et al., 1998).

El **arrocillo** (*Parthenium hysterophorus* L.) (Figura 6.A) también conocida como Altamisa, es una hierba que puede ser encontrada desde la zona norte (Estados de Chihuahua y Nuevo León) hasta la región centro-este (Veracruz y Puebla) y suroeste (Guerrero) (Hanan Alipi & Mondragón Pichardo, 2009). Es usada por la población cocinando sus hojas en infusión para ser tomada antes de cada comida. Además, el enfermo se debe bañar cada tercer día con el

cocimiento de la **verbena** (Figura 6.B) (*Verbena litoralis* H.B.K.) y no exponerse al aire después del baño. (Aguilar Contreras et al., 1998). El **guayacán** (Figura 6.C) (*Acosmium panamense*) y la **damiana** (Figura 6.D) o hoja de fibre (*Turnera diffusa*) son plantas que antiguamente se utilizaban en baños y en infusiones para el tratamiento de la malaria. En el guayacán se emplea la corteza, mientras que en la hoja de fiebre se utiliza la parte aérea —tallo, hojas, flores y frutos (Frei et al., 1998). **Bayetilla**, también conocida como coralillo o tres hojitas (*Hamelia patens* Jacq.) (Figura 6.E), es una planta arbustiva que se encuentra en regiones de clima cálido y semicálido. Es usada para tratar a la malaria preparando una infusión con 3 hojas para posteriormente ser tomada (Aguilar Contreras et al., 1998).

Tabla 1. Plantas medicinales utilizadas en México para el tratamiento de la malaria.

Nombre popular	Nombre científico	Familia botánica
Ajo	<i>Allium sativum</i> L.	LILIACEAE
Altamisa	<i>Parthenium hysterophorus</i> L.	COMPOSITAE
Amapola	<i>Papaver somniferum</i> L.	PAPAVERACEAE
Anemats (L. Mixe)	<i>Russelia sarmentosa</i> Jacq.	SCROPHULARIACEAE
Campana bomol	<i>Brugmansia arborea</i> (L.) Lagerh	SOLANACEAE
Cempazuchil	<i>Tagetes erecta</i> L.	COMPOSITAE
Copalchi	<i>Coutarea latiflora</i> Moc. & Sessé	RUBIACEAE
Copalchi	<i>Hintonia latiflora var leiantha</i> (DC.) Bullock	RUBIACEAE
Fresno	<i>Fraxinus uhdei</i> (Wenz.) Lingelsh.	OLEACEAE
Guayacán	<i>Acosmium panamense</i> (Benth.) Yakovzelev	LEGUMINOSAE
Sikaxinga (L. Mixe)	<i>Polymnia maculata</i> Cav.	COMPOSITAE
Tres hojitas	<i>Hamelia patens</i> Jacq.	RUBIACEAE
Xjo'oyok (L. Maya)	<i>Morinda yucatanensis</i> Greenm.	RUBIACEAE
Verbena	<i>Verbena litoralis</i> H.B.K.	VERBENACEAE

Nota: Los nombres botánicos tienen el siguiente formato: género (en cursiva, con mayúscula) y el epíteto específico o especie (en cursiva y minúscula). La abreviatura del autor (ej. L. para Linneo) indica quién describió la especie. Si el autor aparece entre paréntesis (ej. (L.)), la especie fue originalmente descrita en otro género.



Figura 6. (A) Hierba arrocillo y la estructura de Parthenin (Hanan Alipi, A. M., & Mondragón Pichardo 2009, 2009). (B) Verbena con la estructura de verbenalina, fotografía de Pedro Tenorio Lezama (Hanan Alipi & Mondragón Pichardo, 2009). (C) Planta de guayacán y estructura de la quinolizidina (CONABIO, 2024). (D) Planta damiana y la estructura de luteolina (CONABIO, 2024). (E) Planta bayetilla, fotografía por Pedro Tenorio Lezama (Hanan Alipi & Mondragón Pichardo, 2009) y estructura química de pteropodina.

Clasificación de fitoquímicos para el tratamiento de la malaria

Actualmente, la Organización Mundial de la Salud menciona que el tratamiento más eficaz contra *P. falciparum* es la polifarmacoterapia, que es el uso de varios medicamentos para tratar la enfermedad, combinando a la artemisinina con algún otro medicamento (Terapia Combinada basada en Artemisinina (ACT)) (Rathod et al., 2022).

La **artemisinina** o Qinghaosu es un compuesto que fue extraído de las hojas de la hierba *Artemisia annua* (Qinghao) (Figura 7). Esta hierba ha sido utilizada desde hace más de 2000 años en la medicina tradicional China como medicamento antimalárico. Es un fármaco eficaz contra la espe-

cie *P. falciparum* (Qinghaosu Antimalaria Coordinating Research group, 1979; Tse et al., 2019)

Una amplia variedad de compuestos de origen vegetal (fitoquímicos) ha demostrado actividad antimalárica, clasificándose en alcaloides, flavonoides, terpenoides, quinonas, cumarinas, compuestos fenólicos, poliacetilenos, xantonas, esteroides y lignanos (Amoa Ongué et al., 2013). Aunque el mecanismo responsable de esta actividad biológica aún no se ha esclarecido, la identificación de dianas terapéuticas moleculares representa un área clave para el diseño de fármacos específicos basados en fitoquímicos.

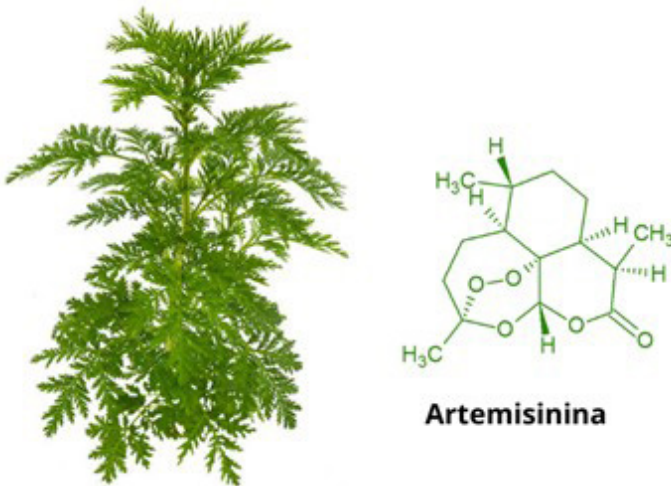


Figura 7. Planta *Artemisia annua* y estructura química de la artemisinina (Kingston & Cassera, 2022)

Alcaloides

Algunos alcaloides identificados con actividad antimalárica son la **caslarina A** (Figura 8) aislada de las hojas de *Cassia siamea* (Kingston & Cassera, 2022), usada tradicionalmente en Indonesia para tratar la fiebre y la malaria (Tajuddeen & Van Heerden, 2019). **Liscamina** y **trivalvona** (Figura 8) mostraron actividad antimalárica y provienen de las hojas de *Annickia kummeriae* (Annonaceae)

de Tanzania. Las plantas de este género son conocidas en África central y occidental por su uso en el tratamiento de la malaria (Bekono et al., 2020). El indolizidino: **prosopilosidina** (Figura 8), fue aislado de las hojas de *Prosopis glandulosa* Torrey var. *glandulosa* (Leguminosae), presentó una potente actividad antimalárica a una cepa con resistencia a la cloroquina (Bero, 2011).

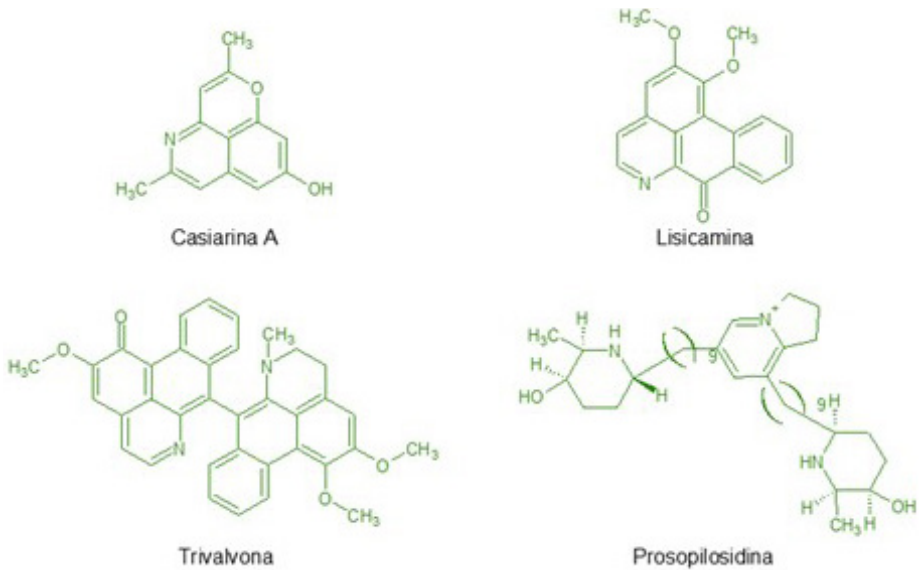


Figura 8. Estructuras químicas de algunos alcaloides con actividad antimalárica (Elaboración propia).

Flavonoides

Las flavanonas **artocarpesina** y **kushenol E** (Figura 9) fueron aisladas de la corteza de tallo de *Morus mesozygia* (Moráceas) de Camerún. Esta planta es usada para el tratamiento de

muchas enfermedades, entre ellas la malaria y la fiebre. Estos son algunos de los compuestos con actividad antiplasmodial contra *P. falciparum* (Ntie-Kang et al., 2014).

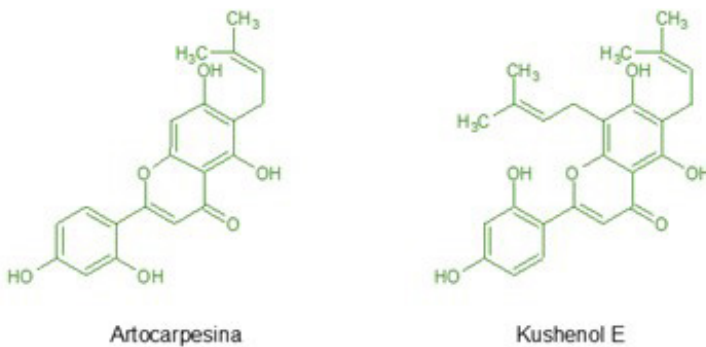


Figura 9. Estructuras químicas de flavonoides con actividad antimalárica (Elaboración propia).

Terpenoides

Los limonoides **metilangolensato** extraído de la corteza y de las semillas de la planta *Khaya grandifoliola* (Meliaceae) que se usa en la subregión de África Central para tratar dolencias, incluida la malaria y **acetato de 7 α -obacunilo** aislado

de la corteza de tallo de *Entandrophragma angolense* (Meliaceae), ambas cosechadas en Camerún, presentaron una considerable actividad contra el parásito de la malaria (Figura 10) (Amoa Ongué et al., 2013).

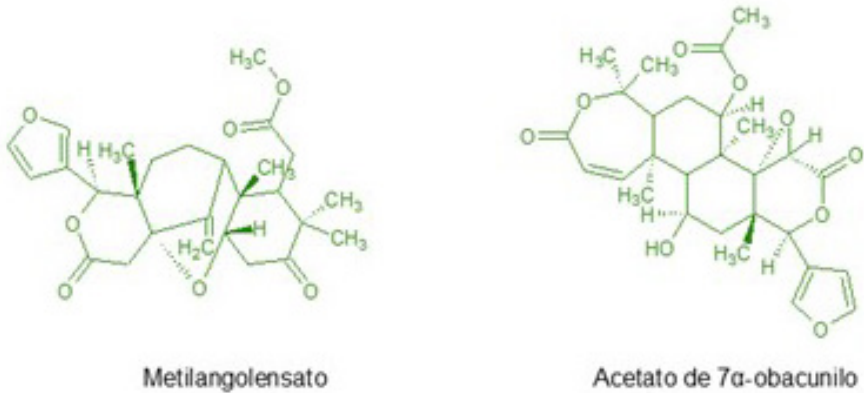


Figura 10. Estructuras químicas de terpenoides con actividad antimalárica (Elaboración propia).

Quinonas

Las naftoquinonas **psicorubrina**, extraídas de las hojas de *Pentas longiflora* (Rubiaceae), planta utilizada en la medicina tradicional de Kenia para tratar a la malaria y la **plumbagina** principal fitoquímico de varias especies

de *Plumbago* (Plumbaginaceae), incluyendo *Plumbago indica* y *Plumbago zeylanica* aislado de las raíces, mostraron tener actividad antipalúdica a *P. falciparum* (Figura 11) (Tajuddeen & Van Heerden, 2019).

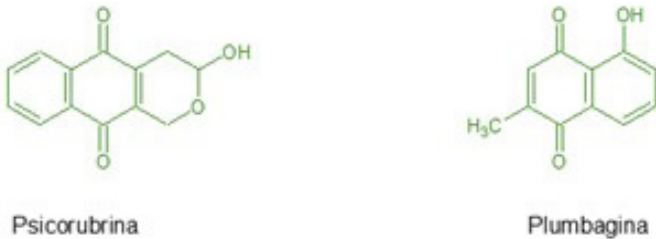


Figura 11. Estructuras químicas de quinonas con actividad antimalárica (Elaboración propia).

Conclusiones

La malaria es una enfermedad infecciosa que sigue siendo un gran reto para la salud pública a nivel mundial. Uno de los principales desafíos es que muchos de los medicamentos son cada vez menos efectivos, debido a la resistencia desarrollada por el agente infeccioso. Ante esta problemática, los fitoquímicos representan una gran oportunidad al utilizarlos como estructuras moleculares base para el diseño de nuevos fármacos antimaláricos. Con ayuda de herramientas computacionales del área de la química y la biología, se puede entender cómo los fitofármacos actúan a nivel molecular con posibles dianas terapéuticas centradas en el parásito que provoca la malaria. [1.1][1.2]

Algunas **casilarinas** han mostrado actividad antimalárica en estudios *in vitro* frente a la cepa de *Plasmodium falciparum* (Negi et al., 2018). Además, sus propiedades moleculares, toxicidad y capacidad inhibitoria o activadora de algunas dianas moleculares del parásito se han evaluado usando técnicas computacionales, como cálculos basados en la teoría del funcional de la densidad, cálculos de acoplamiento molecular y simulaciones de dinámica molecular (Devanath et al., 2024).

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 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

Estefanía del Alba Lizama García[4.1][4.2] agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca de Maestría (CVU: 1340304). 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

- Aguilar Contreras, A., Camacho Pulido, J. R., Chino Vargas, S., Jacquez Ríos, P., & López Villafraanco, M. E. (1998). Plantas medicinales del herbario IMSS: Su distribución por enfermedades. Instituto Mexicano del Seguro Social/Grupo Roche Syntex.
- Amoa Ongué, P., Ntie-Kang, F., Lifongo, L. L., Ndom, J. C., Sippl, W., & Mbaze, L. M. (2013). The potential of anti-malarial compounds derived from African medicinal plants. Part I: A pharmacological evaluation of alkaloids and terpenoids. *Malaria Journal*, 12(1), 449. <https://doi.org/10.1186/1475-2875-12-449>
- Bekono, B. D., Ntie-Kang, F., Ongué, P. A., Lifongo, L. L., Sippl, W., Fester, K., & Owono, L. C. O. (2020). The potential of anti-malarial compounds derived from African medicinal plants: A review of pharmacological evaluations from 2013 to 2019. *Malaria Journal*, 19(1), 183. <https://doi.org/10.1186/s12936-020-03231-7>
- Bero, J. Q.-L., Joëlle. (2011). Natural Products Published in 2009 from Plants Traditionally Used to Treat Malaria. *Planta Medica*, 77(06), 631-640. <https://doi.org/10.1055/s-0030-1250405>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2024). Bálsama amarillo. Enciclopedia. Recuperado el 8 de julio de 2025, de <https://enciclovida.mx/especies/239571>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2024). Damiana. Enciclopedia. Recuperado el 8 de julio de 2025, de <https://enciclovida.mx/especies/6031798>
- Devanath, B., Chetia, B., Shakya, A., Ghosh, S. K., Patgiri, S. J., Bhowmick, I. P., Singh, U. P., & Bhat, H. R. (2024). In silico study, synthesis and antimalarial evaluation of hybrid pyridine substituted pyrazole 1,3,5-triazine derivatives. *3 Biotech*, 14(12), 301. <https://doi.org/10.1007/s13205-024-04129-w>
- Frei, B., Baltisberger, M., Sticher, O., & Heinrich, M. (1998). Medical ethnobotany of the Zapotecs of the Isthmus-Sierra (Oaxaca, Mexico): Documentation and assessment of indigenous uses. *Journal of Ethnopharmacology*, 62(2), 149-165. [https://doi.org/10.1016/S0378-8741\(98\)00051-8](https://doi.org/10.1016/S0378-8741(98)00051-8)
- Hanan Alipi, A. M., & Mondragón Pichardo, J. (2009, agosto 16), Malezas de México, Asteraceae Parthenium hysterophorus L., fecha de acceso 2025, julio 08, <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/asteraceae/parthenium-hysterophorus/fichas/ficha.htm>
- Hanan Alipi, A. M., & Mondragón Pichardo, J. (2009, agosto 10), Malezas de México, Rubiaceae Hamelia patens Jacq, fecha de acceso 2025, julio 08, <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/rubiaceae/hamelia-patens/fichas/pagina1.htm>
- Hanan Alipi, A. M., & Mondragón Pichardo, J. (2010, junio 24), Malezas de México, Verbena litoralis Kunth, fecha de acceso 2025, agosto 08, <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/verbenaceae/verbena-litoralis/fichas/ficha.htm#9.%20Referencias>
- Kingston, D. G. I., & Cassera, M. B. (2022). *Antimalarial Natural Products (Vol. 117)*. Springer Nature Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-89873-1>
- Negi, A., Bhandari, N., Shyamal, B. R. K., & Chaudhary, S. (2018). Inverse docking based screening and identification of protein targets for Cassiarin alkaloids against Plasmodium falciparum. *Saudi Pharmaceutical Journal*, 26(4), 546-567. <https://doi.org/10.1016/j.sjps.2018.01.017>
- Ntie-Kang, F., Ongué, P. A., Lifongo, L. L., Ndom, J. C., Sippl, W., & Mbaze, L. M. (2014). The potential of anti-malarial compounds derived from African medicinal plants, part II: a pharmacological evaluation of non-alkaloids and non-terpenoids. *Malaria Journal*, 13(1), 81. <https://doi.org/10.1186/1475-2875-13-81>
- Organización Mundial de la Salud. (2024, diciembre 11). Paludismo. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/malaria>
- Organización Panamericana de la Salud & Organización Panamericana de la Salud. (2023). Directrices de la OMS sobre la malaria, 13 de julio del 2021. <https://iris.paho.org/handle/10665.2/57291>
- Qinghaosu Antimalaria Coordinating Research group. (1979). ANTIMALARIA STUDIES ON QINGHAOSU. *Chinese Medical Journal*, 92(12), 811-816. <https://doi.org/10.5555/cmj.0366-6999.92.12.p811.01>
- Rathod, G. K., Jain, M., Sharma, K. K., Das, S., Basak, A., & Jain, R. (2022). New structural classes of antimalarials. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 242, 114653. <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2022.114653>
- Salinas, N. D., Tang, W. K., & Tolia, N. H. (2019). Blood-Stage Malaria Parasite Antigens: Structure, Function, and Vaccine Potential. Mechanisms and Strategies of Host Response to Pathogens, 431(21), 4259-4280. <https://doi.org/10.1016/j.jmb.2019.05.018>

Secretaría de Salud. (2025, julio 4). Informe Quincenal de Vigilancia Epidemiológica de Paludismo 2025. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/salud/documentos/informe-quincenal-de-vigilancia-epidemiologica-de-paludismo-2025>

Tajuddeen, N., & Van Heerden, F. R. (2019). Antiplasmodial natural products: An update. *Malaria Journal*, 18(1), 404. <https://doi.org/10.1186/s12936-019-3026-1>

The Editors of Encyclopaedia Britannica. (s/f). Anopheles. Encyclopaedia Britannica. <https://www.britannica.com/animal/Anopheles#/media/1/26605/321507>

Tilley, L., Dixon, M. W. A., & Kirk, K. (2011). The Plasmodium falciparum-infected red blood cell. *The International Journal of Biochemistry & Cell Biology*, 43(6), 839–842. <https://doi.org/10.1016/j.biocel.2011.03.012>

Tse, E. G., Korsik, M., & Todd, M. H. (2019). The past, present and future of anti-malarial medicines. *Malaria Journal*, 18:93(1). <https://doi.org/10.1186/s12936-019-2724-z>

World Health Organization. (2024). World malaria report 2024: Addressing inequity in the global malaria response.

Recepción: 19.11.2025

Revisión: 30.12.2025

Publicación: 15.01.2026

<https://orcid.org/0000-0003-4392-7028>

<https://orcid.org/0009-0005-5091-8543>

<https://orcid.org/0000-0002-9628-1251>

<https://orcid.org/0000-0001-5404-754X>

TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA PARA LA INDUSTRIA POBLANA: VER POR DENTRO SIN DESTRUIR

COMPUTED TOMOGRAPHY FOR INDUSTRY IN PUEBLA: SEEING INSIDE WITHOUT DESTRUCTION

Jorge Raúl Cerna Cortez*¹

Gabriela Esquina Arenas¹

César Márquez Beltrán²

Laura Morales Lara³

¹Dirección de Innovación y Transferencia del Conocimiento (DITCo),
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.

²Instituto de Física,
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.

³Facultad de Ciencias Químicas,
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.

Correos:

jorge.cerna@correo.buap.mx*

gabriela.esquinaarenas@correo.buap.mx

cesar.marquez@correo.buap.mx

laura.morales@correo.buap.mx

Resumen

La tomografía computarizada de rayos X (CT, por sus siglas en inglés) es una técnica de ensayo no destructivo que permite obtener imágenes tridimensionales del interior de un objeto sin cortarlo ni dañarlo. Aunque se asocia principalmente con el diagnóstico médico, en las últimas décadas se ha convertido en una herramienta estratégica para la industria manufacturera, particularmente en sectores como el automotriz, el aeroespacial, el electrónico y el de materiales avanzados. En este artículo se presenta, en un lenguaje de divulgación científica, el principio de funcionamiento de la tomografía computarizada y su aplicación en la industria poblana, destacando el papel de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla a través del Laboratorio de Innovación y Materiales Aplicados (LIMA-DITCo). Se describen casos típicos de uso —inspección de piezas complejas, análisis de fallas, control de calidad en impresión 3D y evaluación de baterías—, así como las ventajas y limitaciones de la técnica frente a otros métodos de ensayo. Finalmente, se enfatiza la importancia de contar con infraestructura científica de alta especialización en universidades públicas para apoyar la competitividad industrial, la conservación del patrimonio y la formación de talento en la región.

Palabras clave: tomografía computarizada; rayos X; ensayo no destructivo; control de calidad; industria automotriz.

Abstract

X-ray computed tomography (CT) is a nondestructive testing technique that provides three-dimensional images of the interior of an object without cutting or damaging it. Although it is commonly associated with medical diagnosis, in recent decades it has become a strategic tool for manufacturing industries, particularly in the automotive, aerospace, electronics, and advanced materials sectors. This article presents, in an accessible scientific outreach format, the basic working principles of computed tomography and its application in the industrial context of Puebla, Mexico, highlighting the role of the Benemérita Universidad Autónoma de Puebla through the Applied Materials and Innovation Laboratory (LIMA-DITCo). Typical use cases include inspection of complex parts, failure analysis, quality control in 3D printing, and battery evaluation, as well as the main advantages and limitations of the technique compared with other testing methods. Finally, the article stresses the importance of high-level scientific infrastructure within public universities to support industrial competitiveness, heritage conservation, and talent training in the region.

Keywords: computed tomography; X-rays; non-destructive testing; quality control; automotive industry.

Introducción

En esencia, la tomografía computarizada consiste en irradiar un objeto con rayos X desde múltiples ángulos, medir la intensidad transmitida con un detector y, a partir de esas proyecciones, reconstruir matemáticamente un volumen 3D discretizado en vóxeles (Kalender, 2011). Aunque el principio físico es el mismo que en la radiografía industrial convencional, la CT agrega la dimensión volumétrica: en lugar de una sola imagen superpuesta, se obtiene un modelo tridimensional que permite recorrer cortes arbitrarios, hacer mediciones internas y cuantificar porosidad, espesores y defectos con gran detalle (Sun, Brown, & Leach, 2012; IAEA, 2020).

La transición de la CT desde la medicina hacia la industria ha sido impulsada por la disponibilidad de equipos de mayor energía, detectores digitales más sensibles y algoritmos de reconstrucción y filtrado más robustos (Carmignato et al., 2018). Al mismo tiempo, la presión por reducir tiempos de desarrollo de producto, aumentar la confiabilidad y documentar mejor las fallas ha hecho que sectores como el automotriz, el aeroespacial y el de manufactura avanzada incorporen la tomografía como parte de su caja de herramientas de ensayos no destructivos (Sharma, 2023; Abdollahi-Mamoudan et al., 2025).

En un estado como Puebla, con una industria automotriz consolidada, empresas de autopartes, manufactura avanzada, plásticos, metalmecánica y un ecosistema creciente de dispositivos y componentes de alto valor agregado, la tomografía computarizada se vuelve una herramienta particularmente pertinente para mejorar procesos,

reducir retrabajos y fortalecer la trazabilidad de la calidad.

Desarrollo

¿Qué es la tomografía computarizada de rayos x?

La tomografía computarizada puede entenderse como una evolución de la radiografía tradicional. Mientras que en una radiografía se hace pasar un haz de rayos X a través de un objeto y se registra la atenuación en un detector plano, en CT se siguen, de manera general, los siguientes pasos (Kalender, 2011; Sun et al., 2012; IAEA, 2020):

1. El objeto se coloca sobre una plataforma giratoria.
2. Se toman múltiples proyecciones desde diferentes ángulos, como si se fotografiara el objeto alrededor de 360 grados.
3. Una computadora aplica algoritmos de reconstrucción —como la retroproyección filtrada u otros métodos iterativos— para integrar esa información y generar un volumen tridimensional de vóxeles, donde cada uno representa el nivel de atenuación local de los rayos X.
4. El resultado es un escaneo completo del interior de la muestra, que permite realizar cortes virtuales en cualquier plano, medir espesores, detectar poros, inclusiones, grietas o zonas con materiales distintos.

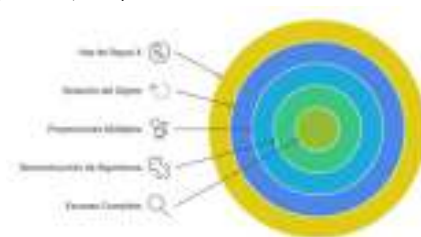


Figura 1. Proceso de escaneo 3D en Tomografía Computarizada (CT) (Autoría Propia)

La calidad del resultado depende de parámetros como la energía y el espectro del haz de rayos X, la resolución espacial, la relación campo de visión/tamaño de la pieza, la relación señal-ruido, la presencia de artefactos (endurecimiento de haz, dispersión, anillos) y la correcta calibración geométrica del sistema (Kalender, 2011; De Chiffre et al., 2014). En aplicaciones metro-lógicas, además de la calidad de imagen, es crítico estimar y minimizar la incertidumbre de medición para que las dimensiones obtenidas por CT sean comparables con otros equipos de

metrología dimensional (Carmignato et al., 2018; Martínez-García et al., 2025).

En términos físicos, la atenuación de los rayos X depende de la densidad y del número atómico efectivo de los materiales. Por ello, la CT es particularmente útil cuando se requiere diferenciar entre regiones de distinta densidad (por ejemplo, vacíos frente a metal) o entre materiales con contraste suficiente, como en el caso de piezas multicapa, compósitos o ensamblajes con insertos.



Figura 2. Imagen radiográfica 2D (izquierda), imágenes 2D y 3D de reconstrucción en tomografía computarizada (derecha).

De la medicina a la industria

Históricamente, la tomografía computarizada se desarrolló para aplicaciones médicas; sin embargo, los mismos principios pueden aplicarse a componentes industriales (du Plessis et al., 2016). El salto de la clínica al taller implica varios cambios:

- En medicina se trabajan tejidos blandos y hueso; en la industria se analizan metales, polímeros, cerámicos, compuestos y ensamblajes complejos.
- Los objetos industriales suelen ser más pequeños, pero mucho más densos, lo que exige fuentes de rayos X de mayor tensión (hasta cientos de kV) y detectores especializados (IAEA, 2020; De Chiffre et al., 2014).

- La metrología industrial demanda mediciones dimensionales precisas, por lo que se combinan técnicas de CT con análisis geométrico y software de ingeniería asistida por computadora (CAD/CAE), incluyendo la comparación directa del volumen escaneado con el modelo nominal (Carmignato et al., 2018; Bellens et al., 2024).

En Puebla, la presencia de armadoras automotrices, empresas de autopartes, proveedores de sistemas electrónicos, fabricantes de moldes e inyección de plástico, así como un sector creciente de manufactura aditiva, convierte a la tomografía computarizada en un aliado natural para reducir incertidumbre en diseño y proceso.

¿Qué puede ver la CT que otros métodos no ven?

Los métodos tradicionales de inspección, como la medición dimensional por contacto, la microscopía óptica o la metalografía, siguen siendo fundamentales. No obstante, presentan limitaciones cuando se trata de componentes internos o geometrías complicadas. La CT ofrece varias ventajas (De Chiffre et al., 2014; Sietins et al., 2022; Abdollahi-Mamoudan et al., 2025):

Visualización interna completa. Permite observar cavidades, canales, insertos, uniones y defectos en el interior de una pieza sin cortarla. Esto es clave en componentes de fundición, piezas soldadas, conectores eléctricos o dispositivos ensamblados.

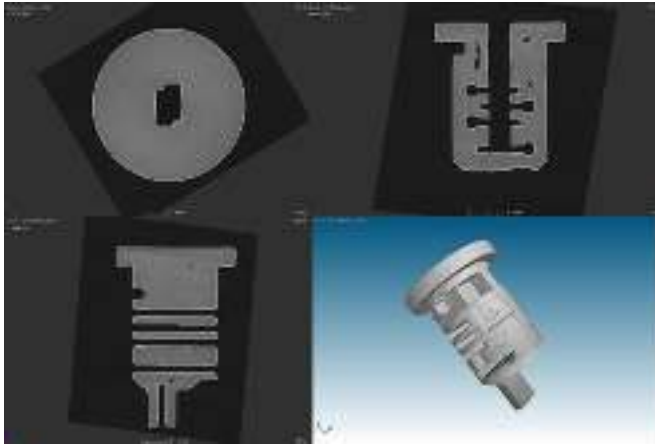


Figura 3. Vista 2D y 3D de reconstrucción de pieza plástica detección de inspección por fallo estructural. (Autoría Propia).

Detección de porosidad y grietas. Los poros y grietas internas pueden afectar la resistencia mecánica, la hermeticidad o el desempeño en servicio. La CT cuantifica tamaño, distribución y

volumen de poros, información valiosa para ajustar parámetros de proceso en fundición, inyección de plástico o impresión 3D (Lang et al., 2023; Martínez-García et al., 2025).

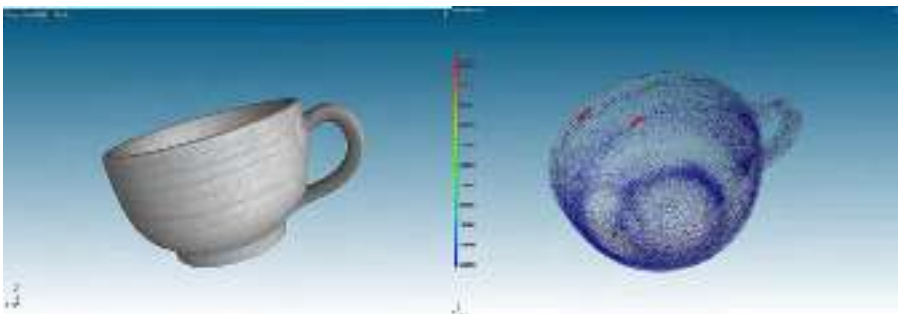


Figura 4. Pieza de barro vista 3D (izquierda), análisis de porosidad (derecha). (Autoría propia)

Comparación con diseño CAD. Al superponer el volumen obtenido por CT con el modelo de diseño, es posible evaluar desviaciones dimensionales, deformaciones y contracciones. Este

tipo de análisis es especialmente útil en prototipado, validación de moldes y ajustes finos de procesos (Carmignato et al., 2018; Bellens et al., 2024).

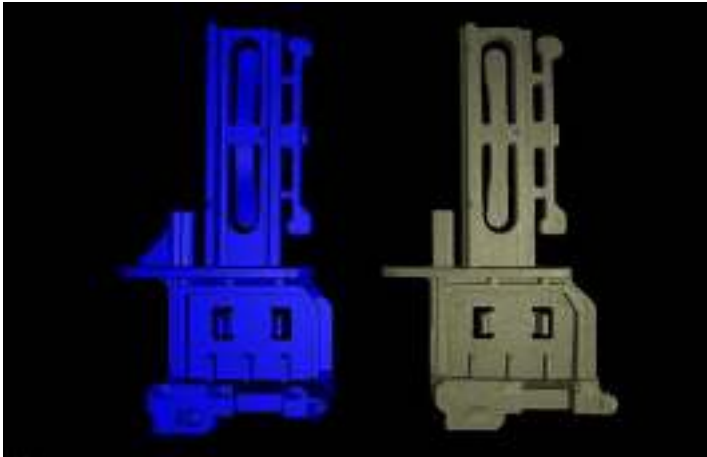


Figura 5. Comparación Nominal/Actual CAD, diseño digital (izquierda), imagen 3D pieza manufacturada (derecha). (Autoría propia)

Análisis de ensamblajes y mecanismos. En productos que integran múltiples componentes—como válvulas, actuadores, sensores o baterías— la CT permite verificar el posicionamiento de piezas, la presencia de holguras y el estado de uniones mecánicas o adhesivas (Olanami et al., 2023; Ghosh et al., 2023).

Estudios de falla no destructivos. Ante una falla en servicio, cortar una pieza suele destruir evidencia importante. La CT permite explorar el interior, identificar el origen de la grieta o la zona crítica y, si es necesario, seleccionar de forma precisa dónde realizar cortes posteriores para análisis complementarios (Sharma, 2023; du Plessis et al., 2016).

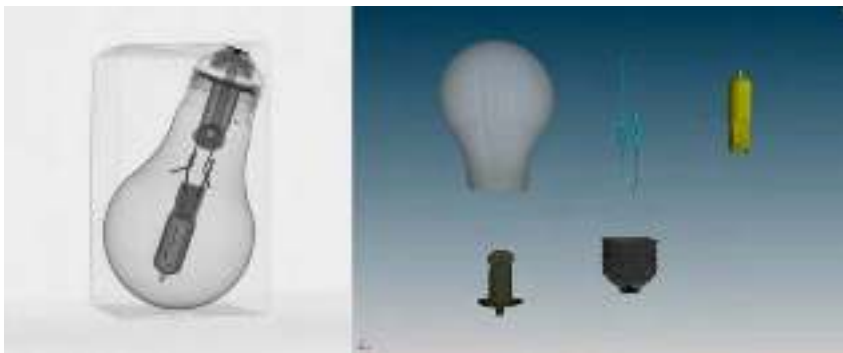


Figura 6. Segmentación en piezas multicomponentes. Imagen radiográfica (izquierda) y reconstrucción tridimensional (derecha). (Autoría Propia)manufacturada (derecha). (Autoría propia)

Casos de aplicación en la industria poblana

Sin entrar en detalles confidenciales, pueden describirse algunos escenarios típicos donde un centro como LIMA-DITCo/CAPAND resulta estratégico para la industria de Puebla:

Componentes automotrices de seguridad. Piezas como soportes estructurales, elementos de

suspensión o carcasas de frenos deben cumplir estándares estrictos. La CT permite detectar porosidad excesiva en fundiciones, falta de material en zonas críticas o defectos de soldadura que podrían comprometer la seguridad del vehículo (De Chiffre et al., 2014; IAEA, 2020).



Figura 7. Imagen 3D pieza automotriz. (Autoría propia)

Piezas plásticas e inyectadas. En autopartes interiores, carcasas de sensores o conectores eléctricos, la técnica ayuda a identificar atrapa-

miento de aire, rebabas internas o deficiencias en el llenado del molde, lo que orienta ajustes de temperatura, presión o diseño de compuertas.



Figura 8. Imagen 3D pieza plástica con análisis de porosidad. (Autoría propia)

Impresión 3D y manufactura aditiva. La fabricación capa por capa puede generar defectos internos difíciles de detectar externamente. La CT permite verificar densidad, porosidad y

continuidad de estructuras complejas, aspecto crítico cuando se emplean piezas impresas en aplicaciones funcionales o de seguridad (Sietins et al., 2022; Abdollahi-Mamoudan et al., 2025).



Figura 9. Pieza arqueológica Museo Comunitario Xiutetelco, Puebla (izquierda), Tomografía Computarizada (central) e Impresión 3D (derecho). (Autoría propia)

Dispositivos electrónicos y baterías. En módulos electrónicos encapsulados o paquetes de baterías, la CT ayuda a verificar alineación, contacto entre componentes, presencia de

vacíos en compuestos encapsulantes y posibles deformaciones internas asociadas con ciclos de carga y descarga (Lang et al., 2023; Olakanmi et al., 2023).

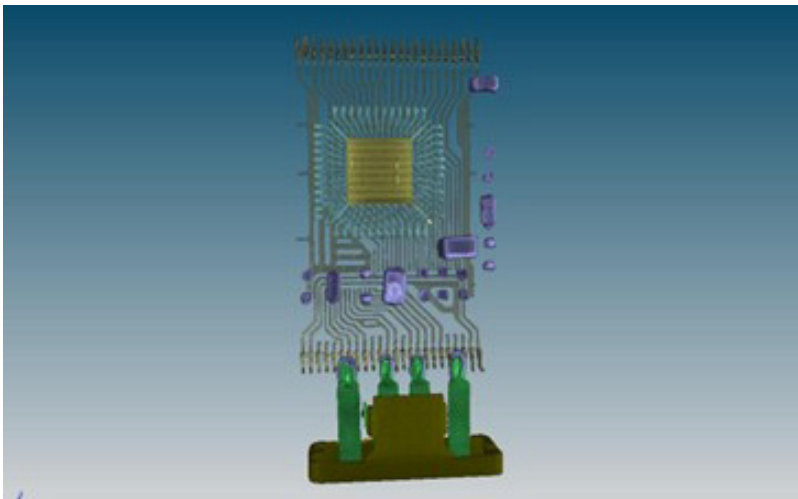


Figura 10. Segmentación en dispositivo con circuito integrado. (Autoría propia)grafía Computarizada (central) e Impresión 3D (derecho). (Autoría propia)

Materiales avanzados y compuestos. La combinación de matrices poliméricas con fibras o cargas requiere conocer la distribución espacial de las fases. La CT ofrece una visión tridimensional que complementa técnicas como la microscopía o la espectroscopía, por ejemplo, en materiales de cambio de fase, geociencias o suelos (Applications of X-ray computed tomography

in the geosciences, 2013; Martínez-García et al., 2025; Ghosh et al., 2023).

En todos estos casos, el valor no reside solo en obtener imágenes espectaculares, sino en traducir los resultados en decisiones de proceso, diseño y garantía de calidad.

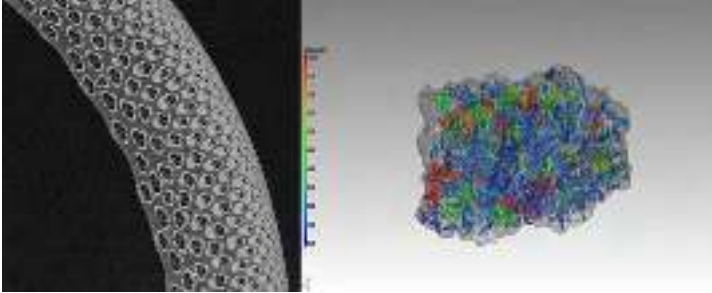


Figura 11. Fibra de Bambú (izquierda) y Muestra volcánica con análisis de inclusiones (derecha). (Autoría propia) Computarizada (central) e Impresión 3D (derecho). (Autoría propia)

LIMA-DITCo: Infraestructura de frontera en la universidad pública

El Laboratorio de Innovación y Materiales Aplicados (LIMA-DITCo), de la BUAP, se ha consolidado como un nodo de servicios e investigación en tomografía computarizada y otros métodos de ensayo no destructivo. Esta infraestructura permite:

- Ofrecer servicios especializados a empresas que, de otro modo, tendrían que enviar sus muestras al extranjero para ser caracterizadas.
- Desarrollar proyectos de investigación aplicada en colaboración con la industria, en temas de diseño de materiales, análisis de fallas y optimización de procesos.
- Formar estudiantes de licenciatura y posgrado en el manejo e interpretación de técnicas avanzadas de caracterización, fortaleciendo el capital humano de la región.



Figura 12. Tomógrafo Computarizado de fuente dual 225kV/450kV ubicado en LIMA-DITCo BUAP. (Autoría propia) Computarizada (central) e Impresión 3D (derecho). (Autoría propia)

A lo largo de casi diez años de operación, el trabajo del laboratorio ha trascendido el ámbito local: actualmente se tiene presencia en **13 estados de la República Mexicana**, a través de servicios, proyectos y colaboraciones con universidades, centros públicos de investigación, dependencias gubernamentales y empresas del sector productivo. Esta red de vinculación incluye tanto aliados industriales —como **Exponent Inc.**, firma internacional de análisis y peritaje técnico— como colaboraciones académicas y de patrimonio cultural con instituciones como el **Departamento de Antropología de las Américas de la Universidad de Bonn** (Alemania), la

Dirección de Antropología Física del INAH y el **Instituto de Investigaciones Antropológicas de la UNAM**.

Estas alianzas han permitido aplicar la tomografía computarizada no solo a componentes industriales, sino también al estudio de restos óseos, materiales arqueológicos, piezas de interés antropológico y materiales fosilizados, demostrando que la misma tecnología que sirve para inspeccionar una pieza automotriz puede aportar conocimiento sobre la historia biológica y cultural de las poblaciones humanas.



Figura 13. Vinculación pública y privada con LIMA-DITCo BUAP

Conclusiones

La tomografía computarizada de rayos X se ha convertido en una herramienta indispensable para la industria moderna, en particular en sectores donde la seguridad, la confiabilidad y la precisión son innegociables (De Chiffre et al., 2014; Sharma, 2023). En un estado como Puebla, con una fuerte vocación manufacturera y una creciente diversificación hacia materiales avanzados y tecnologías emergentes, contar con capacidades de ensayo no destructivo de alto nivel deja de ser un lujo para convertirse en un factor de competitividad.

Al mismo tiempo, la existencia de laboratorios como LIMA-DITCo en la BUAP demuestra que la universidad pública puede desempeñar un

papel estratégico en la articulación entre ciencia, industria y patrimonio cultural. A través de la tomografía computarizada, no solo se observan poros, grietas o ensamblajes ocultos; también se visibiliza la importancia de invertir en infraestructura científica y en talento humano capaz de interpretar lo que esas imágenes revelan.

Ver por dentro, sin destruir, es una metáfora poderosa: la CT no solo permite entender mejor los materiales y productos, sino también imaginar una relación más estrecha entre investigación académica, innovación tecnológica, conservación del patrimonio y desarrollo industrial en Puebla (Bellens et al., 2024; X-ray computed tomography – materials science topic overview, 2023).

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses relacionado con el contenido de este manuscrito.

Declaración de privacidad

Los datos técnicos y la información complementaria asociada a este trabajo pueden ser proporcionados por el autor de correspondencia a solicitud justificada. Los datos personales de los autores se utilizarán exclusivamente con fines editoriales y no se compartirán con 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

Se agradece el apoyo institucional de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, así como la colaboración de las dependencias y empresas que han participado en proyectos vinculados con el LIMA-DITCo.

Referencias

- Abdollahi-Mamoudan, F., Ibarra-Castanedo, C., & Maldague, X. P. V. (2025). Non-destructive testing and evaluation of hybrid and advanced structures: A comprehensive review of methods, applications, and emerging trends. *Sensors*, 25(12), 3635. <https://doi.org/10.3390/s25123635>
- Applications of X-ray computed tomography in the geosciences. (2013). Geological Society, London, Special Publications, 215(1), 1–16. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2003.215.01.01>
- Bellens, S., et al. (2024). Machine learning in industrial X-ray computed tomography. *NDT & E International*, 143, 102804. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2023.102804>
- Carmignato, S., Dewulf, W., & Leach, R. (Eds.). (2018). *Industrial X-ray computed tomography*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-59573-3>
- De Chiffre, L., Carmignato, S., Kruth, J.-P., Schmitt, R., & Weckenmann, A. (2014). Industrial applications of computed tomography. *CIRP Annals*, 63(2), 655–677. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.011>
- Du Plessis, A., le Roux, S. G., & Guelpa, A. (2016). Comparison of medical and industrial X-ray computed tomography for non-destructive testing. *Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation*, 6, 17–25. <https://doi.org/10.1016/j.csndt.2016.07.001>
- Ghosh, T., Sarkar, S., Bhunia, S. S., & Hazra, G. C. (2023). Application of X-ray computed tomography in soil and plant research. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1216630. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1216630>
- International Atomic Energy Agency. (2008). *Industrial process gamma tomography (IAEA-TECDOC-1589)*. IAEA.
- International Atomic Energy Agency. (2020). *An introduction to practical industrial tomography techniques for non-destructive testing (NDT) (IAEA-TECDOC-1931)*. IAEA.
- Kalender, W. A. (2011). *Computed tomography: Fundamentals, system technology, image quality, applications (3rd ed.)*. Wiley-VCH.
- Lang, J. T., et al. (2023). X-ray tomography applied to electrochemical devices and materials. *Chemical Reviews*, 123(5), 3084–3141. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00873>
- Martínez-García, J., et al. (2025). Applications of X-ray computed tomography technology in the characterization of phase change materials. *Energies*, 18(17), 4704. <https://doi.org/10.3390/en18174704>
- Olakanmi, E. O., et al. (2023). Applications of X-ray micro-computed tomography and small-angle X-ray scattering techniques in food systems: A concise review. *Journal of Food Engineering*, 342, 111355. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111355>
- Rigaku. (2022). *CT analysis software product review: VGSTUDIO*. Rigaku Corporation. <https://rigaku.com/products/imaging-ndt/x-ray-ct/learning/blog/ct-analysis-software-review-vgstudio>
- Sharma, K. (2023). Computed tomography (CT) for non-destructive evaluation: Enhancing inspection capabilities and 3D visualization. *European Chemical Bulletin*, 12(8), 2676–2691. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5156497>
- Sietins, J. M., et al. (2022). Material evaluation using X-ray computed tomography. In *Materials characterization using non-destructive evaluation (NDE) methods* (pp. 203–242). CRC Press.
- Sun, W., Brown, S. B., & Leach, R. K. (2012). An overview of industrial X-ray computed tomography (NPL Report ENG 32). National Physical Laboratory.
- Volume Graphics. (2023a). *VGSTUDIO MAX – Analysis and visualization of CT data*. Volume Graphics/Hexagon. <https://volumegraphics.hexagon.com/en/products/vgstudio-max.html>
- Volume Graphics. (2023b). *VGMETROLOGY – CT-based metrology software*. Volume Graphics/Hexagon. <https://volumegraphics.hexagon.com/en/products/vgmetrology.html>
- Volume Graphics. (2023c). *Volume Graphics product family overview*. Volume Graphics / Exact Metrology. <https://www.exactmetrology.com/product/volumegraphics/>
- X-ray computed tomography – Materials science topic overview. (2023). ScienceDirect Topics. Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/x-ray-computed-tomography>

Recepción: 19.01.2025

Revisión: 30.12.2025

Publicación: 15.01.2026

<https://orcid.org/0000-0003-1351-3107>

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

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

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

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

INFLUENZA, UN VIRUS EN CONSTANTE CAMBIO

INFLUENZA, A CHANGING VIRUS

Mari Toña Juárez Méndez^{1*}

María Eugenia Castro²

Thomas Scior³

Norma A. Caballero⁴

Francisco J. Melendez⁵

¹Estancia posdoctoral. Centro de Química del Instituto de Ciencias, ICUAP, BUAP, 72570, Puebla, México

²Centro de Química del Instituto de Ciencias, ICUAP, BUAP, 72570, Puebla, México

³Laboratorio de Simulaciones Moleculares Computacionales, Facultad de Ciencias Químicas, BUAP, 72570, Puebla México

³Facultad de Ciencias Biológicas, BUAP, 72570, México

⁴Laboratorio de Química Teórica, Facultad de Ciencias Químicas, BUAP, 72570, Puebla, México

Correos:

col538674@colaborador.buap.mx*

mareug.castro@correo.buap.mx

thomas.scior@correo.buap.mx

norma.caballero@correo.buap.mx

francisco.melendez@correo.buap.mx

Resumen

Vivimos en una época con un enorme conocimiento para mejorar la calidad de vida de las personas, sin embargo; la amenaza de enfermedades altamente contagiosas es una realidad. El virus de la influenza es un virus contagioso de fácil dispersión que ha sido el causante de cuatro pandemias en los últimos 100 años. Actualmente, las vacunas y moléculas con actividad antiviral son dos estrategias efectivas para el tratamiento de la influenza. En este artículo, se describen brevemente las características estructurales de este virus, así como el pasado, presente y su capacidad de mutación, la cual le ha permitido ser causante de las pandemias. Además, se destaca la búsqueda de moléculas con actividad antiviral en recursos naturales valiosos y abundantes como lo son las plantas. Hasta el día de hoy se han identificado más de 200,000 moléculas en plantas, entre las cuales han mostrado actividad contra el virus de influenza, dicha actividad es identificada gracias a estudios preclínicos y clínicos, los cuales requieren consumo de recursos y tiempo. Afortunadamente, gracias a los esfuerzos y avances científicos, y en especial al desarrollo de herramientas computacionales (*in silico*), se pueden disminuir los costos y tiempos para la selección y diseño de moléculas antivirales y de este modo estar mejor preparados ante la amenaza de un nuevo virus.

Palabras clave: *Influenza, neuraminidasa, hemaglutinina, antiviral, in silico.*

Abstract

Humanity has the know-how to improve life; however, the threat of highly contagious diseases are real. The influenza virus is easily spread and contagious that has caused four pandemics over the past 100 years. Vaccines and antiviral molecules are two effective strategies for treating influenza. This document briefly describes the structural characteristics of this virus, as well as its past, present, and its ability to mutate, allowing it to evade the immune system and cause pandemics. Additionally, the article highlights plants as valuable and abundant resources for discovering antiviral molecules. In plants, more than 200,000 secondary metabolites have been identified, some of which have shown activity against the influenza virus. This activity is identified through preclinical and clinical trials that require waste resources and time. As an asset, scientific progress has enabled researchers to develop computational simulations (*in silico*) that can help reduce costs and time for the selection of antiviral molecules and respond efficiently to the threat of a new virus.

Keywords: *Influenza, neuraminidase, hemagglutinin, antiviral, in silico.*

Introducción

Hablar de influenza, es un tema común hoy día, pero si retrocediéramos en el tiempo antes del 2009, ese término sería totalmente desconocido; y es que en 2009 México tuvo los reflectores a nivel mundial por ser el origen de la pandemia de influenza de 2009, la cual ha cobrado más de 500 000 vidas (da Costa et al., 2020).

¿Acaso era la primera vez que aparecía en escena este virus? La respuesta es no: el virus fue aislado por primera vez en 1933, pero no fue sino hasta la década de los 40 cuando comenzó a consolidarse el conocimiento sobre este (Hope-Simpson and Golubev, 1987), solamente que estábamos acostumbrados a nombrarlo como “gripe”. Pero debido a ello surgen varias preguntas, ¿Qué es la influenza?, ¿por qué en 2009 causó una pandemia?, ¿habrá otra pandemia? Y finalmente, ¿qué medidas se están tomando contra este virus y cómo impacta en diferentes áreas de investigación?

Conociendo al virus

El virus de la influenza es un virus respiratorio que se clasifica en cuatro tipos: A, B, C y D. Los tipos A y B son los más frecuentes en humanos, mientras que C y D son los más frecuentes en otros organismos (Figura 1A). El tipo A puede contagiar tanto a humanos como a aves y ha sido el causante de cuatro pandemias, por lo que nos centraremos en éste.

La influenza tipo A, se caracteriza por poseer 8 segmentos de ARN dentro de una membrana compuesta principalmente por proteínas, en dicha membrana posee dos proteínas: la hemaglutinina (HA) y la neuraminidasa (NA), las cuales le permiten al virus reconocer a las células que se encuentran en el sistema respiratorio para poder llevar a cabo la infección y replicación (generar más virus de influenza) para propagarse fácilmente (Figura 1B) y ser altamente contagioso (Liang, 2023).

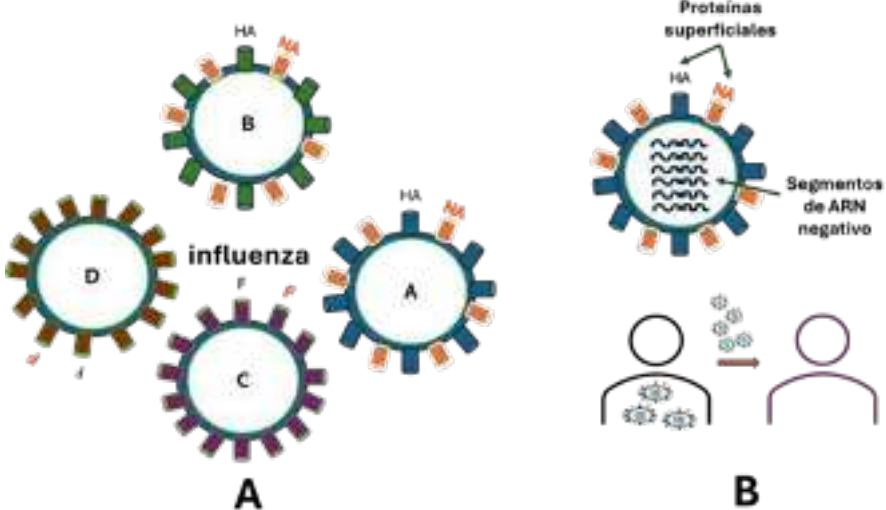


Figura 1. (A) Tipos de virus de influenza donde se observa que los tipos A y B abundan en proteínas superficiales HA y NA mientras que la influenza C y D son abundantes en una proteína conocida como HEF por sus siglas en inglés (Hemagglutinin-Esterase-Fusion) por lo que carecen de HA y NA. (B) El tipo A es la abundante en proteínas superficiales NA y HA; posee 8 segmentos de ARN negativo, infecta principalmente a humanos y es de fácil transmisión. Elaboración propia.

Este virus de influenza debido a sus 8 segmentos de ARN y sus dos proteínas superficiales (HA y NA) puede mutar fácilmente generando nuevas cepas que el sistema inmune (guardián de todo organismo de agentes extraños), no le es fácil reconocer por lo que se generan complicaciones relacionadas con el sistema respiratorio provocando la muerte (OMS, 2025). Estos cambios generados en el virus le permiten evadir al sistema inmune y se conocen como “la deriva antigénica (antigenic drift) y el salto/cambio antigénico (antigenic shift)”.

La deriva antigénica (Figura 2A) consiste en pequeños cambios en la forma y estructura de

las proteínas superficiales, estos cambios son los causantes de contraer gripe varias veces a lo largo del año. En cuanto al salto antigénico (Figura 2B), es un cambio drástico en el material genético del virus que da como resultado nuevas proteínas de HA y NA (actualmente se conocen 18 diferentes HA y 11 diferentes NA) o combinaciones entre ellas, que pueden dar paso a una variedad de posibles diferentes subtipos de virus de influenza. Por ello al surgir un nuevo subtipo e infectar por primera vez a una persona, podría desencadenar una pandemia, si bien este último cambio ocurre con poca frecuencia, ya han ocurrido al menos cuatro pandemias a lo largo de la historia (Liang, 2023).

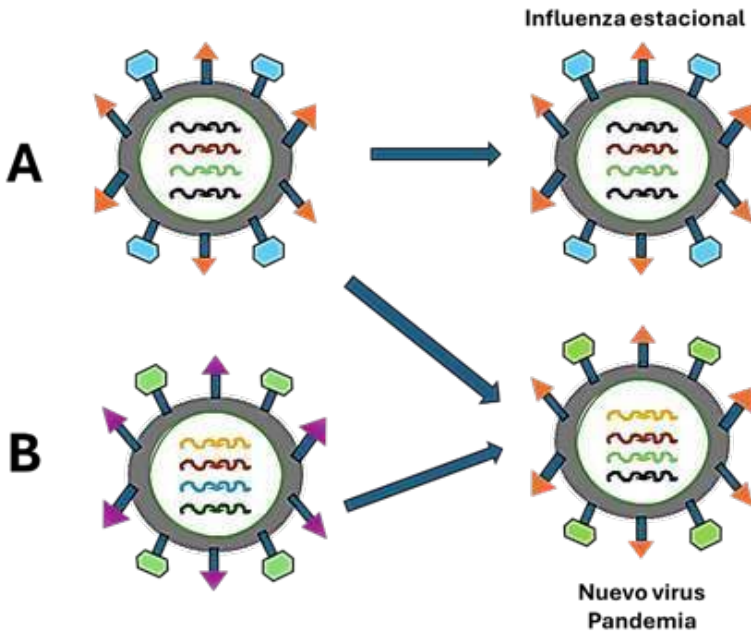


Figura 2. Cambios que ocurren en los virus de influenza, la deriva antigénica (A) que son cambios muy pequeños en el virus y provocan gripe estacional anualmente; mientras que el salto antigénico (B) consiste en la unión de cepas virales distintas lo que genera un nuevo virus que puede provocar una pandemia (Elaboración propia).

Las pandemias en la historia reciente

Existen evidencias de la presencia del virus de la influenza desde antes de 1900, pero no se conocía en su totalidad sino hasta la Primera Guerra Mundial, donde de acuerdo a la literatura se conoce que las bases militares contaban con zonas cercanas a granjas de cerdos, patos y gansos creando las condiciones perfectas para que comenzaran a presentarse síntomas respiratorios, comúnmente conocido como “gripe española”, que en poco tiempo desató una pandemia devastadora provocando la muerte de aproximadamente entre el 3% y el 5% de la población mundial en el año de 1918 (Figura 3A) (Aassve et al., 2021).

¿Qué pasó en esos años para que se dieran las condiciones de una nueva cepa viral? El origen de las pandemias de influenza implica la con-

vergencia de varios eventos debido a la amplia gama de especies hospedadoras, el genoma segmentado de los virus de la influenza y las proteínas superficiales del virus. Como se mencionó anteriormente, la “gripe española” reunió grupos de personas, temperaturas y convivencia con animales de granja, condiciones ideales para que este virus comenzara a propagarse rápidamente. Las tres pandemias siguientes son el resultado, de acuerdo con las fuentes de información, de que las nuevas cepas virales surgieran a través del contacto de humanos, aves y cerdos; ya que se ha demostrado que los cerdos pueden infectarse con muchos subtipos diferentes de influenza aviar (aves), y estos a su vez transmitirla a humanos y viceversa (Harrington et al., 2021).

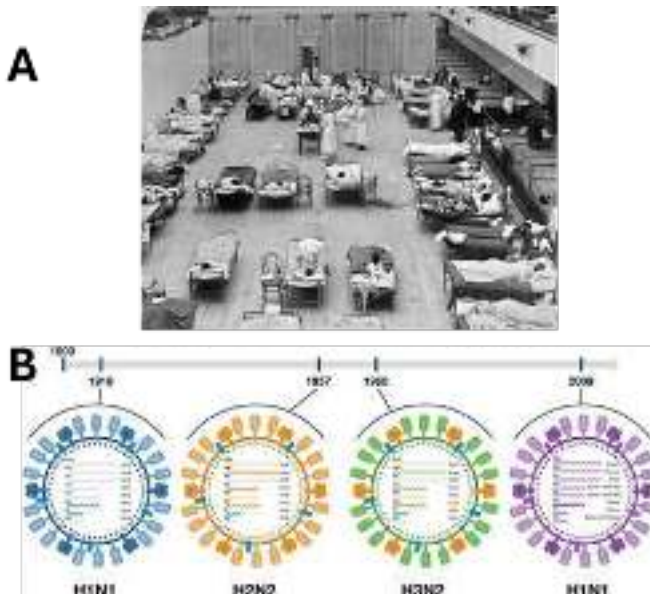


Figura 3. (A) Enfermeras voluntarias de la Cruz Roja Estadounidense atienden a pacientes con influenza en el Auditorio Municipal de Oakland, durante la gripe española (Berche, 2022) y (B) línea del tiempo de las cuatro principales pandemias causadas por el virus de la influenza

Respecto a la pandemia de 2009, el análisis de los segmentos genéticos del virus A(H1N1) pdm09, provienen de virus aviáres, porcinos y humanos (ya habían pasado poco más de 4 décadas de la última pandemia) y el mundo tenía otras preocupaciones, pero este suceso recordó la importancia de no bajar la guardia. Actualmente, las instituciones de salud cuen-

tan con comités que monitorean los casos de influenza para vigilar los virus en circulación, así como las zonas y temporadas con mayor prevalencia y de este modo, seguir estrategias para una mejor respuesta para prevenir o responder a una futura pandemia, como lo es el monitoreo del actual virus en circulación H3N2K (Zambon and Hayden, 2025).

Estrategias contra el virus de la influenza

Actualmente, los institutos de salud pública de cada entidad federal, coordinados por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2025), tienen un plan para el manejo adecuado de los casos de influenza que incluye cuatro estrategias: (1) la vacunación, el éxito de ésta dependerá del diseño adecuado de vacunas con los virus de mayor circulación, (2) vigilancia continua, para detectar cepas de virus nuevas y potencialmente peligrosas lo antes posible, (3) monitorear constantemente los informes epidemiológicos, y (4) la búsqueda de nuevas moléculas antivirales (CDC, 2025).

Esta última estrategia es de gran relevancia para varios grupos de investigación en el mundo. Los antivirales consisten en moléculas que interactúan con alguna proteína del virus, como las superficiales (NA y HA) y/o proteínas que se encuentran dentro de la membrana del virus (Figura 4A). Entre algunos de ellos encontramos a los adamantanos (ya no se recomiendan para uso clínico, ya que los virus estacionales circulantes son naturalmente resistentes), Favipiravir, el cual interfiere con la ARN polimerasa y los más utilizados son los que actúan a nivel NA (Oseltamivir, Zanamivir y Peramivir) (Figura 4B); sin embargo, algunas cepas del virus son resistentes a dichos antivirales (Holmes et al., 2021).

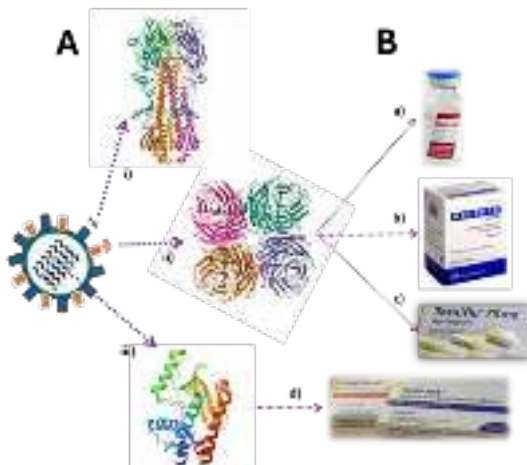


Figura 4. Objetivos antivirales: i) HA, ii) NA y iii) endonucleasa (PA) del virus de influenza (A) y antivirales que actúan a nivel NA: a) Rapivab®, b) Relenza®, c) Tamiflu® y a nivel PA: d) XoFluza® aprobados por la FDA (B). Imágenes tomadas de: <https://www.rcsb.org> (ID: 8VQQ, 2HTY, 6E6W), <https://www.fda.gov>.

Tan solo las plantas, producen una gran variedad de moléculas (metabolitos secundarios) que poseen actividades biológicas como antimicrobianas, antiinflamatorias, carcinogénicas, así como antivirales (Li et al., 2020).

Las plantas, contrario a los animales, no cuentan con un metabolismo catabólico (excreción, eliminación de sus metabolitos), ya que son seres vivos más primitivos, cuentan solamente con

el anabolismo, y por ende, tienen que derivar sus biomoléculas principales modificándose en miles y miles de derivados para su almacenaje sin acumulaciones fatales por presiones osmóticas, etc. (Scior et al., 2007).

Algunas plantas que se han utilizado para el tratamiento de síntomas relacionados con el sistema respiratorio se mencionan en la Tabla 1, así como las moléculas identificadas.

Tabla 1: Algunas plantas utilizadas en infusiones para el tratamiento de síntomas relacionados con enfermedades respiratorias.

Nombre común	Nombre científico	Usos	Moléculas identificadas	Fuente
Bugambilia	Bougainvillea glabra	Resfriado, gripe, tos, bronquitis y asma, además de problemas gastrointestinales.	Flavonoides, taninos, alcaloides, fenoles, betacianinas, terpenoides y glucósidos.	(Ornelas García et al., 2023)
Ajo	Allium sativum L.	Enfermedades con trastornos pulmonares, tos ferina, trastornos estomacales, resfriados y dolor de oído y enfermedades cardiovasculares.	Ajoenos, tiosulfatos (alicina), vinilditinos, sulfuros.	(Batiha et al., 2020)
Eucalipto	Eucalyptus globulus Labill.	Tratamiento contra influenza, antifúngico, antibacterial y antioxidante	Taninos, saponinas, terpenoides, glicosidos, alcaloides, esteroides, resinas, flavonoides entre otros.	(Shala & Gururani, 2021)
Jengibre	Zingiber officinale	Propiedades antioxidantes, antiinflamatorias, antibacterianas, antivirales, anticancerígenas, cardiovasculares y anti diabético.	Sesquiterpenos, monoterpenoides, gingerol, shogaol, zingerol, paradol.	(Hu et al., 2023)
Tomillo	Thymus vulgaris L.	Tratamiento de trastornos respiratorios, incluida la tos ferina, la bronquitis y el catarro. Posee propiedades antisépticas, astringentes, carminativas, tónicas y antihelmínticas.	Compuestos fenólicos, terpenoides, flavonoides, esteroides, alcaloides, taninos y saponinas.	(Patil et al., 2021)

Desde hace décadas, el estudio de compuestos con actividad antiviral se ha llevado a cabo mediante estudios *in vitro* e *in vivo* (Figura 5). Estos experimentos son muy certeros y permiten realizar una selección de moléculas con actividad antiviral, para posteriormente evaluarse en ensayos clínicos para indicar si son efectivos y seguros. Desafortunadamente,

realizar estos estudios conlleva inversión de tiempo y recursos. Por ello, en los últimos 20 años, con el avance de herramientas computacionales, se ha desarrollado un área que permite encontrar las moléculas más prometedoras entre miles, para ser evaluadas en los ensayos preclínicos y clínicos, disminuyendo el tiempo y el costo de investigación (Shaker et al., 2021).

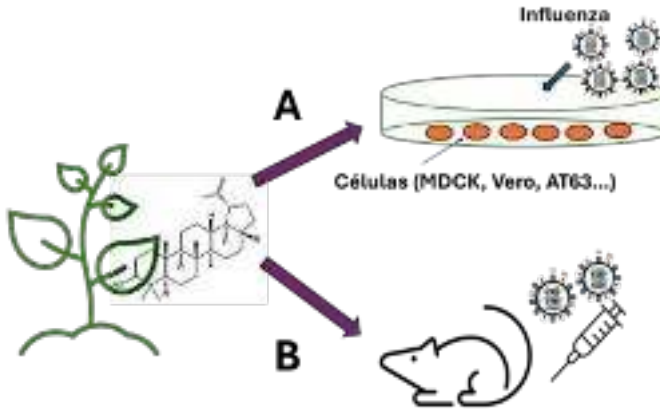


Figura 5. Evaluación de la actividad antiviral de moléculas identificadas en plantas utilizando células y virus de influenza en ensayos *in vitro* (A) e *in vivo* (B) (Elaboración propia).

Estudios *in silico* de la actividad antiviral de moléculas en plantas

En 1989, el matemático de la UNAM Pedro Miramontes usó el término *in silico* por primera vez en el trabajo “DNA and RNA Physicochemical Constraints, Cellular Automata and Molecular” para referirse a la caracterización de experimentos biológicos realizados en una computadora durante el evento “Cellular Automata: Theory and Applications” en Los Álamos, Nuevo México (Mathur et al., 2022; CECAMM, 2022), así que es un término relativamente moderno que se usa para referirse a la experimentación realizada por computadora, haciendo uso de algoritmos basados en homología, en primeros principios (*ab initio*), hasta tecnologías de inteligencia artificial (AI, por sus siglas en inglés), aprendizaje automático (machine learning), entre otros (Shaker et al., 2021).

Diferentes estudios *in silico* se han realizado con moléculas identificadas en plantas para predecir su posible actividad antiviral, entre ellos: el estudio de la energía de afinidad y las interacciones de esas moléculas con las proteínas superficiales HA y NA del virus, técnica conocida como “*docking molecular*” (Makau et al., 2017; Perrier et al., 2019); el estudio de sus propiedades químicas y farmacocinéticas mediante estudios de ADMET (Absorción, Distribución, Metabolismo, Excreción y Toxicidad); y estudios que permiten predecir de manera cuantitativa la actividad antiviral mediante modelos estadísticos de regresión y clasificación, conocidos como QSAR (*Quantitative structure–activity relationship models*) (Scior et al., 2009).

Todas estas técnicas computacionales permiten realizar un cribado entre millones de moléculas, que actualmente han sido identificadas, reduciendo costos y tiempo, para actuar de manera más eficiente frente a las nuevas cepas virales que puedan surgir a lo largo de los años (Figura 6).

Desde 2010, en la BUAP se ha venido trabajando con modelos computacionales para el desarrollo de nuevos antivirales contra la influenza, teniendo como resultado en 2017 las patentes 352708 y 352709 que corresponden a moléculas que mostraron actividad antiviral (Scior et al., 2023).

Actualmente, en la BUAP y en colaboración con otras instituciones del país se realizan estudios in silico de compuestos identificados en plantas, una de ellas es *Diospyros anisandra* (Figura 7A) (Borges-Argaez et al., 2021) dentro de la cual se han identificado moléculas con actividad antiviral contra el virus de influenza (Cetina et al., 2019; Juárez-Méndez et al., 2022) entre los que se encuentran los triterpenos. Estas moléculas se han reportado con una amplia gama de aplicaciones terapéuticas entre las que destacan las antivirales (Darshani et al., 2022) y que recientemente se están evaluando en estudios de acoplamiento molecular con las dos proteínas superficiales del virus (Juárez-Méndez et al.,

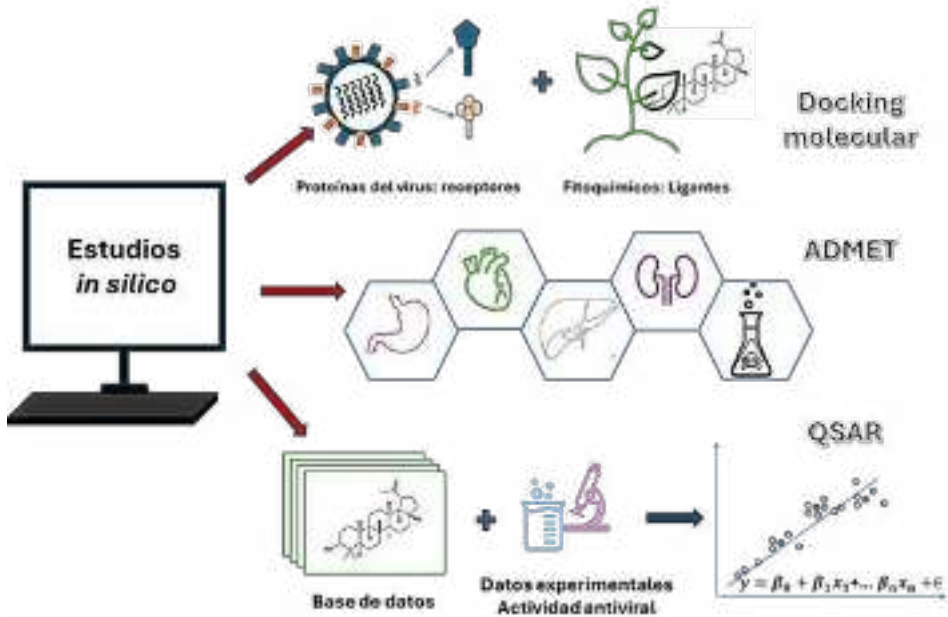


Figura 6. Esquema de estudios *in silico*. Realizados para la predicción de la actividad antiviral de moléculas identificadas en plantas (Elaboración propia).

2025); así como el diseño de modelos QSAR para la predicción de moléculas con actividad antiviral, haciendo uso eficiente de los recursos (Do et al., 2015).

La energía específica para producir un kg de tomates en un sistema hidropónico era apenas un 17 % mayor. Algo bastante más modesto que el 1100% adicional de las lechugas en Arizona. ¿Cómo es esto posible? ¿Es que los tomates no requieren tanta energía como las lechugas? En realidad, la respuesta está en el sistema empleado: mientras que la producción de lechugas en Arizona se lleva a cabo en ambientes altamente controlados en temperatura, iluminación, humedad, etc. El clima mediterráneo del sur de España permite que los tomates pudieran ser cultivados al exterior, sin necesidad de sistemas que permitieran regular el clima o la iluminación,

Perspectivas

La búsqueda de tratamientos antivirales, sigue siendo una prioridad en vista de la fácil dispersión del virus de la influenza y la amenaza de otros virus como el COVID-19, por ello el uso de estudios in silico es hoy en día una herramienta computacional necesaria para complementar los estudios experimentales, reduciendo tiempo y recursos, por otro lado también contribuir al estudio para la mejora de variedades de plantas medicinales, la protección de los recursos de germoplasma, la selección de regiones de plantación adecuadas para la síntesis de metabolitos secundarios con potencial actividad antiviral, y estar preparados no solo para responder a una próxima pandemia, sino a reducir la morbilidad y la mortalidad asociadas con la influenza estacional anual.

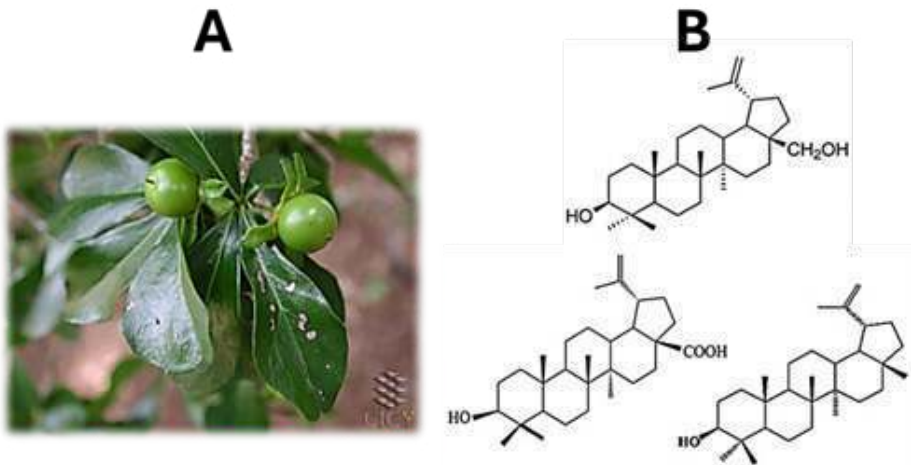


Figura 7. *Diospyros anisandra*, especie ampliamente distribuida en la Península de Yucatán (A) y algunos triterpenos identificados en dicha especie (B). Fotografía: www.cicy.mx

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 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 a la Revista Digital Internacional de Divulgación Científica del Instituto de Ciencias por dar a conocer las diversas temáticas que deben ser conocidas por los lectores.

Referencias

- Aassve, A., Alfani, G., Gandolfi, F., & Le Moglie, M. (2021). Epidemics and trust: The case of the Spanish Flu. *Health Economics (United Kingdom)*, 30(4). <https://doi.org/10.1002/hec.4218>
- Ali, S. I., Sheikh, W. M., Rather, M. A., Venkatesalu, V., Muzamil Bashir, S., & Nabi, S. U. (2021). Medicinal plants: Treasure for antiviral drug discovery. *Phytotherapy Research*, 35(7), 3447–3483. <https://doi.org/10.1002/ptr.7039>
- Batiha, G. E. S., Beshbishy, A. M., Wasef, L. G., Elewa, Y. H. A., Al-Sagan, A. A., El-Hack, M. E. A., Taha, A. E., Abd-Elhakim, Y. M., & Devkota, H. P. (2020). Chemical constituents and pharmacological activities of garlic (*Allium sativum* L.): A review. In *Nutrients* (Vol. 12, Issue 3). <https://doi.org/10.3390/nu12030872>
- Berche P. (2022). The Spanish flu. *Presse medicale* (Paris, France: 1983), 51(3), 104127. <https://doi.org/10.1016/j.lpm.2022.104127>.
- Borges-Argáez, R., Vera-Ku, B., Juárez-Méndez, M.T., Chan-Zapata, I., Jiménez-Alcalá, G., Chi-May, F., Carrillo-Sánchez, L.E. (2021). El K'aakalché (*Diospyros anisandra*), una especie con alto valor farmacéutico. *Desde el Herbario CICY 13*: 152–155. ISSN: 2395-87
- Center for Diseases (2025, august). Influenza (Flu). <https://www.cdc.gov/flu/about/index.html>
- CECAMM. (2025, March). Hybrid Quantum Mechanics / Molecular Mechanics (QM/MM) Approaches to Biochemistry and Beyond. <https://www.cecamm.org/workshop-details/hybrid-quantum-mechanics-molecular-mechanics-qmmm-approaches-to-biochemistry-and-beyond-1030>
- Cetina, L., Guadalupe, M., Talavera, A., & Borges, R. (2019). Zeylanone epoxide isolated from *Diospyros anisandra* stem bark inhibits influenza virus in vitro. *Archives of Virology*, 164 (6) (0123456789), 1543–1552. <https://doi.org/10.1007/s00705-019-04223-y>
- DA Costa, V. G., Saivish, M. V., Santos, D. E. R., de Lima Silva, R. F., & Moreli, M. L. (2020). Comparative epidemiology between the 2009 H1N1 influenza and COVID-19 pandemics. In *Journal of Infection and Public Health* (Vol. 13, Issue 12). <https://doi.org/10.1016/j.jiph.2020.09.023>
- Darshani, P., Sen Sarma, S., Srivastava, A. K., Baishya, R., & Kumar, D. (2022). Anti-viral triterpenes: a review. In *Phytochemistry Reviews* (Vol. 21, Issue 6). <https://doi.org/10.1007/s11101-022-09808-1>
- Do, Q. T., Medina-Franco, J. L., Scior, T., & Bernard, P. (2015). How to Valorize Biodiversity? Let's Go Hashing, Extracting, Filtering, Mining, Fishing. *Planta medica*, 81(6), 436–449. <https://doi.org/10.1055/s-0034-1396314>
- Harrington, W. N., Kackos, C. M., & Webby, R. J. (2021). The evolution and future of influenza pandemic preparedness. *Experimental and Molecular Medicine*, 53(5), 737–749. <https://doi.org/10.1038/s12276-021-00603-0>
- Holmes, E. C., Hurt, A. C., Dobbie, Z., Clinch, B., Oxford, J. S., & Piedra, P. A. (2021). Understanding the impact of resistance to influenza antivirals. In *Clinical Microbiology Reviews* (Vol. 34, Issue 2). <https://doi.org/10.1128/CMR.00224-20>
- Hope-Simpson, R. E., & Golubev, D. B. (1987). A new concept of the epidemic process of influenza A virus. *Epidemiology and Infection*, 99(1). <https://doi.org/10.1017/S0950268800066851>
- Hu, W., Yu, A., Wang, S., Bai, Q., Tang, H., Yang, B., Wang, M., & Kuang, H. (2023). Extraction, Purification, Structural Characteristics, Biological Activities, and Applications of the Polysaccharides from *Zingiber officinale* Roscoe. (*Ginger*): A Review. In *Molecules* (Vol. 28, Issue 9). <https://doi.org/10.3390/molecules28093855>
- Juárez-Méndez, M. T., Borges-Argáez, R., Ayora-Talavera, G., Escalante-Rebolledo, S. E., Escalante-Erosa, F., & Cáceres-Farfán, M. (2022). *Diospyros anisandra* phytochemical analysis and anti-hemagglutinin-neuraminidase activity on influenza A(H1N1)pdm09 virus. *Natural Product Research*, 36(10). <https://doi.org/10.1080/14786419.2021.1917568>
- Juárez-Méndez, M.T., Jiménez-Alcalá, G., Borges-Argáez, R., Chan-Zapata, I., Ayora-Talavera, G., Caballero, Norma A., Meléndez, Francisco J., Castro, María Eugenia (2025). Triterpene derivatives from *Diospyros anisandra* S. F. Blake against influenza A (H1N1) virus: In vitro and in silico assays. [Journal of Molecular Structure, 1351, 2, 144267]. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2025.144267>

- Li, Y., Kong, D., Fu, Y., Sussman, M. R., & Wu, H. (2020). The effect of developmental and environmental factors on secondary metabolites in medicinal plants. In *Plant Physiology and Biochemistry* (Vol. 148). <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.01.006>
- Liang, Y. (2023). Pathogenicity and virulence of influenza. In *Virulence* (Vol. 14, Issue 1). <https://doi.org/10.1080/021505594.2023.2223057>
- Lupiani, B., & Reddy, S. M. (2009). The history of avian influenza. In *Comparative Immunology, Microbiology and Infectious Diseases* (Vol. 32, Issue 4). <https://doi.org/10.1016/j.cimid.2008.01.004>
- Makau, J. N., Watanabe, K., Ishikawa, T., Mizuta, S., Hamada, T., Kobayashi, N., & Nishida, N. (2017). Identification of small molecule inhibitors for influenza a virus using in silico and in vitro approaches. 1–20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0173582>
- Mathur, V. P., Atif, M., Duggal, I., Tewari, N., Duggal, R., & Chawla, A. (2022). Reporting guidelines for in-silico studies using finite element analysis in medicine (RIFEM). *Computer methods and programs in biomedicine*, 216, 106675. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2022.106675>
- Organización Mundial de la Salud. (2025, agosto). Gripe (estacional). [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/influenza-\(seasonal\)](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/influenza-(seasonal)).
- Ornelas García, I. G., Guerrero Barrera, A. L., Avelar González, F. J., Chávez Vela, N. A., & Gutiérrez Montiel, D. (2023). *Bougainvillea glabra* Choisy (Nyctinaginacea): review of phytochemistry and antimicrobial potential. In *Frontiers in Chemistry* (Vol. 11). <https://doi.org/10.3389/fchem.2023.1276514>
- Patil, S. M., Ramu, R., Shirahatti, P. S., Shivamallu, C., & Amachawadi, R. G. (2021). A systematic review on ethnopharmacology, phytochemistry and pharmacological aspects of *Thymus vulgaris* Linn. *Heliyon*, 7(5). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07054>
- Perrier, A., Eluard, M., Petitjean, M., & Vanet, A. (2019). In Silico Design of New Inhibitors Against Hemagglutinin of Influenza. *Journal of Physical Chemistry B*, 123(3). <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.8b10767>
- Scior, T., Medina-Franco, J. L., Do, Q. T., Martínez-Mayorga, K., Yunes Rojas, J. A., & Bernard, P. (2009). How to recognize and workaroud pitfalls in QSAR studies: a critical review. *Current medicinal chemistry*, 16(32), 4297–4313. <https://doi.org/10.2174/092986709789578213>
- Scior, T., Cuanalo-Contreras, K., Islas, A. A., & Martínez-Laguna, Y. (2023). Targeting the Human Influenza a Virus: The Methods, Limitations, and Pitfalls of Virtual Screening for Drug-like Candidates Including Scaffold Hopping and Compound Profiling. *Viruses*, 15(5). <https://doi.org/10.3390/v15051056>
- Shaker, B., Ahmad, S., Lee, J., Jung, C., & Na, D. (2021). In silico methods and tools for drug discovery. In *Computers in Biology and Medicine* (Vol. 137). <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2021.104851>
- Shala, A. Y., & Gururani, M. A. (2021). Phytochemical properties and diverse beneficial roles of eucalyptus globulus labill.: A review. In *Horticulturae* (Vol. 7, Issue 11). <https://doi.org/10.3390/horticulturae7110450>
- Süntar, I. (2020). Importance of ethnopharmacological studies in drug discovery: role of medicinal plants. In *Phytochemistry Reviews* (Vol. 19, Issue 5). <https://doi.org/10.1007/s11101-019-09629-9>
- Zambon, M., & Hayden, F. G. (2025). Influenza A(H3N2) Subclade K Virus: Threat and Response. *JAMA*, 10.1001/jama.2025.25903. Advance online publication. <https://doi.org/10.1001/jama.2025.25903>

Recepción: 18.11.2025

Revisión: 30.12.2025

Publicación: 15.01.2026

<https://orcid.org/0009-0008-0207-7681>

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

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

EL ÁCIDO 5-AMINOLEVULÍNICO (5-ALA) Y LA PSICOPATÍA: UNA CONEXIÓN INESPERADA ENTRE LA BIOQUÍMICA Y LA MENTE CRIMINAL

5-AMINOLEVULINIC ACID (5-ALA) AND PSYCHOPATHY:
AN UNEXPECTED CONNECTION BETWEEN
BIOCHEMISTRY AND THE CRIMINAL MIND

Luis Antonio Cobos Ontiveros^{1*}

María Eugenia Castro²

Francisco J. Melendez³

¹Estancia posdoctoral.

Facultad de Ciencias Químicas, BUAP, 72570, Puebla, México

²Centro de Química del Instituto de Ciencias,

ICUAP, BUAP, 72570, Puebla, México

³Laboratorio de Química Teórica,

Facultad de Ciencias Químicas, BUAP, 72570, Puebla, México

Autor de correspondencia: luis.cobosontiveros@viep.com.mx*

mareug.castro@correo.buap.mx

francisco.melendez@correo.buap.mx

Resumen

El ácido 5-aminolevulínico (5-ALA) es un aminoácido no proteico clave en la biosíntesis del grupo hemo, molécula esencial para la función respiratoria y la actividad neuronal. Aunque su papel metabólico es ampliamente conocido, estudios recientes sugieren que alteraciones en su ruta biosintética podrían tener consecuencias neurológicas profundas, incluyendo cambios en el comportamiento y la regulación emocional. La psicopatía, caracterizada por una falta de empatía, manipulación y conducta antisocial, ha sido históricamente atribuida a factores genéticos y sociales; sin embargo, la evidencia bioquímica abre una nueva línea de reflexión: ¿pueden las moléculas que sustentan la vida también modular los rasgos de la mente criminal? En este artículo se exploran las posibles vías metabólicas y neuroquímicas que podrían vincular indirectamente al 5-ALA con la psicopatía, así como las perspectivas teóricas que podrían emplearse para investigar esta relación desde la química computacional.

Palabras clave: 5-aminolevulínico, psicopatía, bioquímica cerebral, metabolismo del hemo, neurociencia computacional.

Abstract

The 5-aminolevulinic acid (5-ALA) is a non-proteinogenic amino acid essential in the biosynthesis of the heme group, a molecule critical for respiration and neuronal activity. Although its metabolic role is well known, recent studies suggest that alterations in its biosynthetic pathway may produce neurological imbalances, leading to behavioral and emotional dysregulation. Psychopathy, characterized by lack of empathy, manipulation, and antisocial behavior, has traditionally been attributed to genetic or social causes; however, emerging biochemical evidence raises a provocative question: can the same molecules that sustain life influence the roots of moral and emotional detachment? This article explores the possible metabolic and neurochemical pathways linking 5-ALA to psychopathy and discusses theoretical approaches to study this hypothesis through computational chemistry.

Keywords: 5-aminolevulinic acid, psychopathy, brain biochemistry, heme metabolism, computational neuroscience.

Introducción

El ácido 5-aminolevulínico (5-ALA) es una molécula de apariencia modesta, pero de relevancia biológica extraordinaria. Este aminoácido no proteico constituye el primer eslabón en la biosíntesis del grupo hemo, una estructura tetrapirrólica presente en la hemoglobina, la mioglobina y los citocromos que permiten la respiración celular (Yien et al., 2022). En organismos superiores, su síntesis ocurre principalmente en la mitocondria, a partir de la condensación del succinil-CoA y la glicina, catalizada por la enzima ALA-sintasa. Sin este paso inicial, la vida aeróbica simplemente no sería posible.

Por otra parte, la psicopatía es un trastorno de la personalidad caracterizado por una profunda disociación entre la cognición moral y la emoción. Individuos con rasgos psicopáticos suelen presentar un encanto superficial, manipulación, impulsividad y una carencia total de empatía o culpa (Hare, 2023). La historia criminal está plagada de ejemplos que ilustran este perfil: Ted Bundy, Jeffrey Dahmer y Ed Kemper, son nombres que evocan el extremo de la conducta humana, donde la racionalidad y el horror coexisten en un mismo individuo (Figura 1).



Figura 1. Representación conceptual de la psicopatía y su impacto cerebral. Elaboración propia usando Adobe Illustrator e inspirada de: <https://www.publicdomainpictures.net/es/view-image.php?image=263438&picture=silueta-cerebro-logica-mental>

Si bien las causas de la psicopatía se han explorado desde la genética, la neuroanatomía y la psicología evolutiva, las bases bioquímicas aún permanecen difusas. En los últimos años, estudios neuroquímicos han comenzado a sugerir que el metabolismo del hierro, del grupo hemo y de sus precursores puede influir en la función cerebral, especialmente en regiones como la amígdala y la corteza prefrontal, responsables de la empatía, el juicio moral y la inhibición emocional (McCann et al., 2020). Así surge la pregunta: ¿podría una molécula como el 5-ALA, tan esencial para la vida, tener un papel indirecto en los mecanismos de la mente psicopática?

El 5-ALA y su papel metabólico

El 5-ALA es el punto de partida de la ruta biosintética del grupo hemo, cuya secuencia involucra la formación de porfobilinógeno, uroporfirinógeno III, coproporfirinógeno III, protoporfirinógeno IX y finalmente protoporfirina IX (Figura 2). Este último compuesto, al unirse con un átomo de hierro (Fe^{2+}), origina el grupo hemo, una de las coenzimas más versátiles de la naturaleza (Bechara et al., 2021).

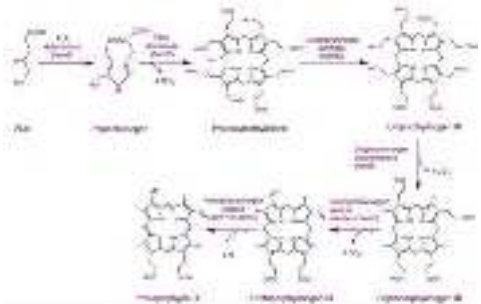


Figura 2. Ruta metabólica simplificada del ácido 5-aminolevulínico hacia la formación del grupo hemo (Panek & O'Brian, 2002).

La biosíntesis del grupo hemo no sólo es vital para la respiración y el transporte de oxígeno, sino también para la actividad neuronal. Los citocromos del sistema nervioso central depen-

den del grupo hemo para realizar la cadena de transporte electrónico que sostiene la homeostasis energética cerebral (Zhao et al., 2019). Un exceso o deficiencia en esta ruta puede generar

estrés oxidativo, liberación de radicales libres y daño a las mitocondrias, condiciones que se han asociado con trastornos neurodegenerativos y de comportamiento (Dutt et al., 2022).

Neuroquímica, hemo y conducta

Diversas investigaciones sugieren que los metabolitos del 5-ALA y del grupo hemo podrían alterar la neurotransmisión. Cuando el metabolismo del grupo hemo se ve comprometido, se acumulan compuestos intermedios como las porfirinas o el mismo 5-ALA libre, que poseen actividad neurotóxica (Agarwal et al., 2020). Se ha demostrado que el 5-ALA en concentraciones elevadas puede atravesar la barrera hematoencefálica y generar especies reactivas de oxígeno (ROS), afectando la dopamina y la serotonina, neurotransmisores clave en el control de la empatía, la impulsividad y la agresión (Figura 3) (Smith & Fsofer, 2018).

En individuos con rasgos psicopáticos, estudios de resonancia magnética funcional muestran una disminución en la actividad de la amígdala y del corte prefrontal ventromedial, estructuras asociadas con la inhibición moral y la respuesta empática (Deming & Koenigs, 2020). Si bien esta alteración ha sido atribuida a factores genéticos o del desarrollo, es plausible considerar que desequilibrios metabólicos —como los inducidos por un exceso de 5-ALA o una deficiencia en su conversión a hemo— podrían contribuir a un patrón de disfunción neuroquímica que modifique la conducta.

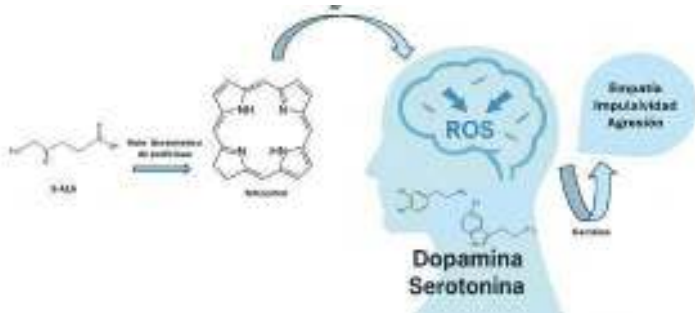


Figura 3. Efecto indirecto del 5-ala sobre las emociones. Elaboración propia usando power point e inspirada de Lehneret & Hunziker 2012.

Evidencia experimental y estudios indirectos

Hasta el momento, no existen estudios que vinculen de manera directa el 5-ALA con la psicopatía; sin embargo, evidencias indirectas abren la posibilidad de una conexión bioquímica. En pacientes con porfirias hepáticas agudas, donde el metabolismo del 5-ALA se encuentra alterado, se han reportado episodios de ansiedad, alucinaciones, agresividad y trastornos del sueño (Ghosh & Kaur, 2006; Gerischer et al., 2021). Estos síntomas

reflejan un desequilibrio neuroquímico que, en casos extremos, podría asemejarse a ciertos rasgos antisociales o psicopáticos.

Asimismo, investigaciones recientes sobre la neuroinflamación inducida por hemo libre han demostrado que este pigmento puede activar microglías y desencadenar respuestas proinflamatorias en el cerebro, afectando la plasticidad

sináptica (Figura 4) (Wang et al., 2022). Si el metabolismo del 5-ALA contribuye a un exceso de hemo o de sus derivados, podría generarse un entorno neurotóxico que altere la conectividad en áreas emocionales críticas.

Desde una perspectiva más amplia, también se ha relacionado el metabolismo del hierro —estrechamente ligado al hemo— con los niveles de

impulsividad y control inhibitorio (Ferreira et al., 2019). La deficiencia de hierro afecta la síntesis de dopamina, un neurotransmisor involucrado en la recompensa y la motivación, procesos distorsionados en la psicopatía (Lukowski et al., 2010). Así, el 5-ALA, al ser un precursor temprano de esta cadena metabólica, podría ser una pieza más en el complejo rompecabezas bioquímico del comportamiento antisocial.



Figura 4. Neuroinflamación inducida por hemo libre y su efecto sobre la plasticidad sináptica. Elaboración propia usando Adobe Illustrator e inspirada en Martínez-Tapia et al., 2018.

Posibles mecanismos de interacción molecular

A nivel molecular, el 5-ALA podría interactuar indirectamente con proteínas del sistema nervioso, particularmente con aquellas que contienen dominios hemo o sensibles al estado redox celular. Se ha propuesto que alteraciones en la homeostasis del hemo modifican la actividad de receptores NMDA y canales iónicos dependientes de voltaje (Seillier et al., 2022). Tales cambios pueden influir en la plasticidad sináptica, la regulación emocional y los procesos de aprendizaje moral.

Otra vía hipotética implica el estrés oxidativo crónico. El 5-ALA, en presencia de luz o metales de transición, puede producir radicales hidroxilo a través de reacciones tipo Fenton, dañando lípidos y proteínas neuronales (Ito et al., 2019). Estos efectos podrían favorecer un ambiente proinflamatorio en regiones corticales asociadas a la empatía. Aunque aún no se dispone de evidencia directa, este tipo de mecanismos justificaría un enfoque teórico desde la química teórica y la biología computacional para explorar tales interacciones.

Conclusión y perspectivas

La posibilidad de que una molécula como el ácido 5-aminolevulínico esté indirectamente implicada en la modulación del comportamiento psicopático resulta provocadora y plantea un puente entre la bioquímica metabólica y la neurociencia del comportamiento. No se trata de afirmar que el 5-ALA "cause" psicopatía, sino de reconocer que su desequilibrio metabólico puede generar condiciones neuroquímicas propicias para la disfunción emocional y moral.

Desde el punto de vista teórico, resulta viable diseñar estudios computacionales que evalúen esta hipótesis. La aplicación de métodos basados en la DFT (Density Functional Theory) podría permitir analizar la reactividad electrónica del 5-ALA y sus derivados frente a especies reacti-

vas de oxígeno, mientras que simulaciones de docking molecular podrían explorar su interacción con receptores neuronales implicados en la regulación de la dopamina o la serotonina. Incluso, enfoques híbridos como ONIOM (QM/MM) podrían modelar la influencia del entorno proteico sobre el 5-ALA dentro de microambientes mitocondriales o sinápticos.

Explorar estas rutas desde la química teórica y computacional no sólo ampliaría nuestra comprensión del metabolismo cerebral, sino que también abriría un nuevo espacio para integrar la química computacional con la psicología forense. Tal vez, en el futuro, comprender la mente criminal implique no sólo estudiar sus actos, sino también las moléculas que los sustentan.

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 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

Cobos Ontiveros agradece a la Secretaría de Ciencias Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) antes CONACYT por la beca de Estancia Posdoctoral (CVU 623751). 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

- Agarwal, S., Habtemariam, B., Xu, Y., Simon, A. R., Kim, J. B., & Robbie, G. J. (2020). Normal reference ranges for urinary -aminolevulinic acid and porphobilinogen levels. *IJMD Reports*, 57(1), 85–93.
- Bechara, E. J. H., Ramos, L. D., & Stevani, C. V. (2021). 5-Aminolevulinic acid: a matter of life and caveats. *Journal of Photochemistry and Photobiology*, 7, 100036.
- Deming, P., & Koenigs, M. (2020). Functional neural correlates of psychopathy: A meta-analysis of MRI data. *Translational Psychiatry*, 10, 133.
- Dutt, S., Hamza, I., & Bartnikas, T. B. (2022). Molecular mechanisms of iron and heme metabolism. *Annual Review of Nutrition*, 42, 311–335.
- Ferreira, A., Neves, P., & Gozzelino, R. (2019). Multilevel impacts of iron in the brain: The cross talk between neurophysiological mechanisms, cognition, and social behavior. *Pharmaceuticals*, 12(3), 126.
- Gerischer, L. M., et al. (2021). Acute porphyrias – A neurological perspective. *Cellular and Molecular Biology*, 67(1), 73–79.
- Ghosh, S., & Kaur, J. (2006). An analysis of six cases of acute intermittent porphyria: Focus on psychiatric manifestations. *Indian Journal of Psychiatry*, 48(3), 180–186.
- Hare, R. D. (2023). Sin conciencia: El inquietante mundo de los psicópatas que nos rodean. Editorial Planeta.
- Ito, H., Kurokawa, H., Suzuki, H., Indo, H. P., Majima, H. J., & Matsui, H. (2019). 5-Aminolevulinic acid induced apoptosis via oxidative stress in normal gastric epithelial cells. *Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition*, 65(2), 83–90.
- Lehner, R., & Hunziker, P. (2012). Why not just switch on the light?: light and its versatile applications in the field of nanomedicine. *European Journal of Nanomedicine*, 4(2-4), 73-80.
- Lukowski, A. F., Koss, M., Burden, M. J., Jonides, J., Nelson, C. A., Kaciroti, N., Jimenez, E., & Lozoff, B. (2010). Iron deficiency in infancy and neurocognitive functioning at 19 years: Evidence of long-term deficits in executive function and recognition memory. *Nutritional Neuroscience*, 13(2), 54–70.
- Martínez-Tapia, R. J., Estrada-Rojo, F., Hernández-Chávez, A. A., Barajas-Martínez, A., Islas Escoto, S., Navarro, L., & Chavarría, A. (2018). Neuroinflammation: the ying-yang of neuroimmunology. *Revista de la Facultad de Medicina (México)*, 61(5), 44-53.
- McCann, S., Perapoch Amadó, M., & Moore, S. E. (2020). The role of iron in brain development: A systematic review. *Nutrients*, 12(7), 2001.
- Panek, H., & O'Brian, M. R. (2002). A whole genome view of prokaryotic haem biosynthesis. *Microbiology*, 148(8), 2273–2282.
- Seillier, C., Lesept, F., Toutirais, O., Potzeka, F., Blanc, M., & Vivien, D. (2022). Targeting NMDA receptors at the neurovascular unit: Past and future treatments for central nervous system diseases. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(18), 10336.
- Smith, A. G., & Foster, J. R. (2018). The association between chemical-induced porphyria and hepatic cancer. *Toxicology Research*, 7, 647–663.
- Wang, Y., Leak, R. K., & Cao, G. (2022). Microglia-mediated neuroinflammation and neuroplasticity after stroke. *Frontiers in Cellular Neuroscience*, 16, 980722.
- Yien, Y. Y., & Peretto, M. (2022). Regulation of heme synthesis by mitochondrial homeostasis proteins. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 10, 895521.
- Zhao, R.-Z., Jiang, S., Zhang, L., & Yu, Z.-B. (2019). Mitochondrial electron transport chain, ROS generation and uncoupling (Review). *International Journal of Molecular Medicine*, 44(1), 3–15.

Recepción: 15.11.2025

Revisión: 30.12.2025

Publicación: 15.01.2026

<https://orcid.org/0009-0008-7074-4837>

<https://orcid.org/0000-0001-6339-2679>

<https://orcid.org/0000-0001-6086-4650>

LA MAGIA EN LA FRONTERA: COMO LOS MATERIALES QUE NO ERAN NI AISLANTES NI CONDUCTORES, REVOLUCIONARON EL MUNDO

MAGIC AT THE BOUNDARY: HOW MATERIALS THAT
WERE NEITHER INSULATORS NOR CONDUCTORS
REVOLUTIONIZED THE WORLD

¹ Gonzalo Cavazos Juárez*

² María Josefina Robles Águila

³ Lidia Esmeralda García DÍaz

¹Doctorado en Ciencias Químicas, BUAP

²Centro de Investigación de Dispositivos Semiconductores, ICUAP

³Centro de Química del Instituto de Ciencias, ICUAP

Correos:

cj225570398@alm.buap.mx*

josefina.robles@correo.buap.mx

esmeralda.garcia@correo.buap.mx

Resumen

En cada teléfono inteligente, supercomputadora y panel solar se encuentra un material semiconductor. Estos materiales han permitido tomar un control sin precedentes sobre la electricidad. Este artículo aborda la historia de la revolución tecnológica a partir del primer transistor en 1947, la creación del circuito integrado en una pastilla de silicio y la profética Ley de Moore que impulsó a la industria durante medio siglo. La diversificación de la tecnología a partir de los materiales semiconductores ha permitido tener dispositivos de iluminación LED, paneles solares que cosechan energía y materiales fotocatalíticos que aportan una alternativa a la eliminación de contaminantes del medio ambiente. En cada teléfono inteligente, supercomputadora y panel solar se encuentra un material semiconductor. Estos materiales han permitido tomar un control sin precedentes sobre la electricidad. Este artículo aborda la historia de la revolución tecnológica a partir del primer transistor en 1947, la creación del circuito integrado en una pastilla de silicio y la profética Ley de Moore que impulsó a la industria durante medio siglo. La diversificación de la tecnología a partir de los materiales semiconductores ha permitido tener dispositivos de iluminación LED, paneles solares que cosechan energía y materiales fotocatalíticos que aportan una alternativa a la eliminación de contaminantes del medio ambiente.

Palabras clave: semiconductor; transistor; circuito integrado; Ley de Moore; fotovoltaica; LED.

Abstract

Every smartphone, supercomputer, and solar panel contains a semiconductor material. These materials have enabled unprecedented control of electricity. This article explores the history of the technological revolution, beginning with the first transistor in 1947, the creation of the integrated circuit on a silicon chip, and the prophetic Moore's Law, which propelled the industry for half a century. The diversification of technology stemming from semiconductor materials has led to LED lighting devices, solar panels that harvest energy, and photocatalytic materials that offer an alternative for removing environmental pollutants.

Keywords: semiconductor; transistor; integrated circuit; Moore's Law; photovoltaic; LED.

Introducción

Vivimos en un mundo construido sobre arena. El silicio es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre y, en su forma pura, es el protagonista de la era de la información. El silicio es un semiconductor, un material de frontera cuyas propiedades eléctricas pueden manipularse de muchas formas.

Antes de los semiconductores, la electrónica dependía de los tubos de vacío. Estos componentes, similares a bombillas incandescentes, eran grandes, frágiles, caros y consumían enormes cantidades de energía. Las primeras computadoras o los sistemas electrónicos de los aviones bombarderos requerían miles de estos tubos, casi imposibles de construir y mantener.

La solución no vino de mejorar el tubo de vacío, sino de un campo completamente nuevo: la física del estado sólido. Investigadores de los Laboratorios Bell buscaban un interruptor sólido y se sumergieron en la teoría cuántica de cómo se mueven los electrones a través de los cristales, buscando un interruptor sólido, sin partes móviles ni filamentos incandescentes. En 1947

El primer hechizo: el genio de cristal (el transistor)

El 23 de diciembre de 1947 (aunque el artículo no se publicaría hasta junio de 1948), John Bardeen y Walter Brattain presentaron a sus colegas de Bell Labs su invención: el transistor de punto de contacto. Usando un cristal de germanio como semiconductor y dos filamentos de oro como contactos, demostraron que una pequeña señal eléctrica aplicada en uno de ellos podía controlar una señal mucho mayor en el otro. Habían creado el primer amplificador de estado sólido.

Este primer transistor era inestable y difícil de fabricar, pero demostró que el concepto era viable. Fue el físico William Shockley quien, en un arranque de genialidad competitiva, desarrolló la teoría fundamental que daría forma a la industria. Shockley teorizó el transistor de unión (Shockley,

se encontró el semiconductor. Se encontró que elementos como el silicio y el germanio, componentes básicos de la arena y el cristal, no eran conductores pero tampoco aislantes (Bardeen & Brattain, 1948) y durante mucho tiempo fueron vistos como curiosidades de laboratorio, malos conductores sin un propósito claro. El error fue pensar en ellos en términos de flujo.

Su verdadero poder no residía en su capacidad para conducir electricidad, sino en su asombrosa susceptibilidad a ser controlada. Se descubrió que su conductividad podía ser alterada, afinada y manipulada con una precisión sin precedentes, respondiendo a la luz, al calor o a pequeños campos eléctricos (Shockley, 1949). No eran un simple cable ni un muro; eran una compuerta.

Este descubrimiento desataría una revolución silenciosa. No fue una explosión, sino un encogimiento; un viaje hacia lo infinitesimal que redefiniría a la civilización humana. Fue como poner un genio en una botella de cristal, construir ciudades enteras en un grano de arena.

1949), un sándwich de materiales semiconductores tipo p y tipo n (con exceso de "huecos" o electrones, respectivamente). El diseño basado en las uniones p-n era robusto, fiable y mucho más fácil de producir en masa. (Figura 1)



Figura 1. Réplica del transistor de punto de contacto original de los Laboratorios Bell.
<https://spectrum.ieee.org/point-contact-transistor>

En la Figura 2 se muestra el diagrama esquemático fundamental que el Dr. Shockley publicó en su artículo para explicar la física de una unión p-n. El panel (a) muestra el dispositivo físico y su conexión. El material tipo-p (portador mayoritario de huecos), el material tipo-n (portador mayoritario de electrones) y la región de agotamiento que se forma en la interfaz. El dispositivo está conectado a una fuente de voltaje ($\delta\Phi$) que aplica una corriente total I de izquierda a derecha. Los contactos en los extremos (x_a y x_b) se asumen como no rectificantes; son solo conexiones eléctricas que no interfieren al paso de corriente. El panel (b) muestra las concentraciones de los átomos “donadores” y “aceptores” que definen las regiones p y n.

La línea punteada muestra los aceptores (N_a). Estos son los átomos que forman el material tipo p. Su concentración es alta a la izquierda y disminuye hacia la derecha. La línea sólida verde muestra los donadores (N_d). Estos son los átomos que forman el material tipo n. Su concentración es baja a la izquierda y alta a la

derecha. La línea roja representa la carga neta de impurezas. En la región p ($x < 0$) hay más aceptores (N_a) que donadores (N_d), por lo que la carga neta es negativa. En la región n ($x > 0$) hay más donadores (N_d) que aceptores (N_a); la carga neta es positiva. En el centro ($x=0$) las concentraciones son iguales y se forma la unión. El panel (c) es el más importante, pues muestra tres posibles comportamientos de la corriente de huecos (I_p) a medida que la corriente total (I) fluye a través del dispositivo. La corriente total I es la suma de la corriente de huecos (I_p) y la corriente de electrones (I_n). En la región p (en x_a) la corriente es transportada por huecos ($I_p=I$). En la región n (en x_b), la corriente es transportada por electrones (la corriente de huecos es cero, $I_p=0$). El dispositivo consiste en una corriente de huecos que se convierte en una corriente de electrones en la unión. En la curva “OHMIC”, los huecos se detienen bruscamente en la unión y no ingresan a la región n. Shockley explica que esto es característico de una unión no rectificante.

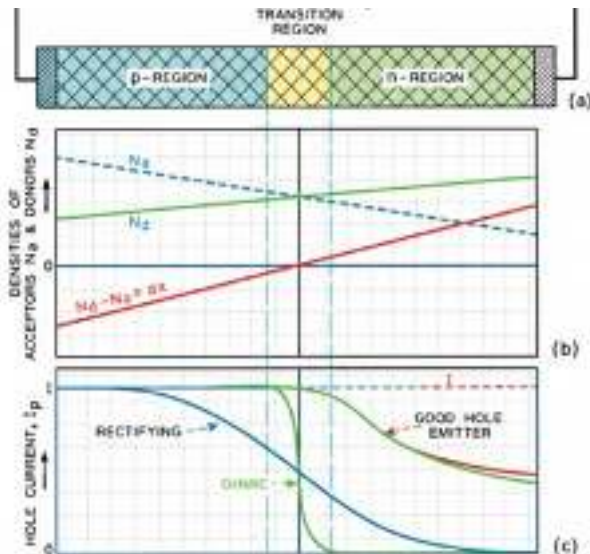


Figura 2. (a) Esquema de una unión p-n. (b) Distribución de impurezas. (c) Corriente de huecos.

Modificado del artículo de Bell System Technical Journal, 28(3), 435-489

En la curva "RECTIFYING" (rectificante), los huecos (I_p) penetran una distancia significativa en la región n antes de desaparecer (recombinarse). Shockley estableció que la penetración de huecos en la región n (y de electrones en la región p) es la característica fundamental de una unión rectificante. La curva GOOD HOLE EMITTER (buen emisor de huecos) es un caso especial de una unión rectificante. Muestra que la mayor parte de la corriente que cruza la unión es de huecos, lo cual es deseable

en un emisor de transistor, que inyecta huecos en el material tipo n (Shockley, 1949).

El impacto fue inmediato y profundo. El transistor era pequeño, consumía una fracción de la energía que un tubo de vacío y era increíblemente duradero. Por esta invención, Bardeen, Brattain y Shockley compartieron el Premio Nobel de Física en 1956, encendiendo la chispa que remodelaría el siglo XX.

La miniaturización: el circuito integrado

El transistor resolvió el problema del tubo de vacío, pero pronto creó otro. Los ingenieros ahora podían usar miles de transistores para construir computadoras, pero cada uno de estos diminutos componentes debía controlarse mediante cables. A esto se le llamó "tiranía de los números": demasiadas interconexiones que debían hacerse.

En el verano de 1958, Jack S. Kilby, un ingeniero de Texas Instruments, tuvo una idea revolucionaria. Si todos los componentes, como transistores, resistores y capacitores, pudieran fabricarse con el mismo material (un semiconductor), ¿por qué no fabricarlos todos juntos en una sola pieza? (Kilby, 1976).

Kilby construyó un prototipo tosco, un oscilador de desplazamiento de fase en una

lámina de germanio, con las interconexiones cableadas a mano y funcionó. La Figura 3 es una fotografía histórica de los componentes individuales (transistores, resistencias y capacitores) que conformaron el primer circuito integrado. A la derecha, se observa el circuito ensamblado, sostenido por una mano. Esta invención marcó el nacimiento de la microelectrónica y sentó las bases para la miniaturización masiva que daría inicio a la era digital y a la electrónica moderna. Poco después, Robert Noyce, de la empresa Fairchild Semiconductor, ideó la solución de interconexión crucial: depositar una capa de metal sobre el chip (protegido por una capa de óxido) y luego grabar el metal para crear los cables directamente sobre la superficie. Había nacido el circuito integrado (CI) monolítico. La revolución estaba lista para escalar.



Figura 3. Componentes del primer circuito integrado (IC) de Jack Kilby. IEEE Transactions on Electron Devices, 23(7), 648-654

La profecía de la Ley de Moore: la tecnología que se duplica cada dos años

Con el transistor y el circuito integrado ya establecidos, la industria comenzó una carrera frenética por la miniaturización. En 1965, Gordon E. Moore, uno de los fundadores de Fairchild y más tarde de Intel, escribió un artículo para la revista *Electronics* que se convertiría en la profecía autocumplida de la industria.

Observando la tendencia de los años anteriores, Moore postuló lo que ahora se conoce como la Ley de Moore: el número de componentes (transistores, resistores, etc.) que podían fabricarse en un circuito integrado se duplicaría cada dos años (Moore, 1965).

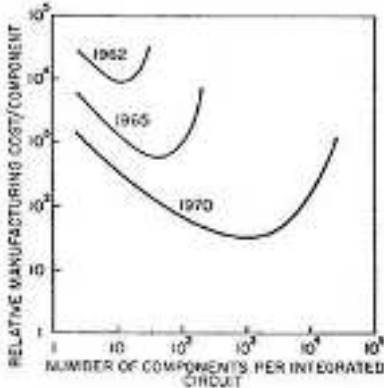


Figura 4. Gráfico logarítmico del número de transistores en microprocesadores a lo largo del tiempo.
Cramming More Components onto Integrated Circuits

Esta ley no era una ley de la física, sino una observación económica y tecnológica. Sin embargo, su poder residía en que la industria de los semiconductores la adoptó como un objetivo. Esta ley se convirtió en el motor implacable de la innovación, reduciendo los costos y aumentando la capacidad informática durante más de cincuenta años.

Por otra parte, se creó el MOSFET (Transistor de Efecto de Campo de Metal-Óxido-Semiconductor), un transistor más pequeño, que funcionaba controlando un canal de portadores de carga con un campo eléctrico, sin requerir un flujo de corriente de control constante.

Pero encoger un MOSFET no era tan simple como reducir una fotografía. A medida que las dimensiones se reducían, los ingenieros se enfrentaron a nuevos problemas físicos. En un artículo fundamental de 1974, R. H. Dennard y sus colegas de IBM establecieron las reglas de escalado. Para mantener el buen funcionamiento de los transistores más pequeños, había que reducir las dimensiones horizontales (como la longitud del canal) y las verticales (como el grosor del óxido de la compuerta), así como los voltajes de operación. Además, surgieron técnicas de dopaje de iones en materiales que permitieron a la industria seguir el ritmo de la Ley de Moore durante décadas (Dennard et al., 1974).

Capturando la luz del sol: del transistor al panel solar

Mientras la industria informática se obsesionaba con hacer los chips más rápidos y densos, los principios fundamentales de los semiconductores estaban abriendo otras oportunidades. La unión p-n que formaba el corazón del transistor de Shockley tenía otra propiedad asombrosa: podía convertir la luz solar directamente en electricidad. Era el efecto fotovoltaico.

En 1961, se publicó el postulado conocido como el principio de Shockley-Queisser (S-Q), que cal-

culó la eficiencia teórica máxima de una celda solar de unión p-n única.

Teniendo en cuenta la energía perdida por los fotones que no tienen suficiente energía para crear un par electrón-hueco, y la energía perdida por los fotones que tienen demasiada energía (que se disipa como calor), establecieron un límite máximo de eficiencia de aproximadamente el 44% para el silicio con una banda prohibida (band gap) óptima de 1.1 eV. En la Figura

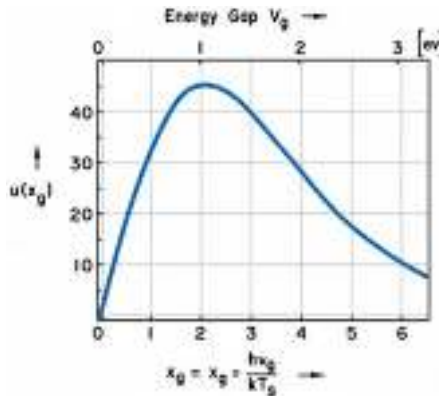


Figura 5. Diagrama fotovoltaico: dependencia de la eficiencia máxima teórica $u(x_g)$ sobre la brecha energética V_g del semiconductor Modificado del artículo de Journal of Applied Physics, 32(3), 510-519

5 se muestra que si la energía del gap es muy baja (izquierda), la celda absorbe muchos fotones, pero la mayor parte de la energía se desperdicia como calor, porque el voltaje V_g que generan es muy bajo y su eficiencia es baja. Si la energía del gap es muy alta (derecha), cada fotón absorbido genera voltaje (V_g), pero muy pocos fotones del sol tienen la energía sufi-

ciente para ser absorbidos. La mayoría de la luz solar atraviesa el material sin hacer nada y la eficiencia también es baja. Este artículo se convirtió en la "Ley de Moore" de la industria solar: el objetivo teórico que todos los ingenieros fotovoltaicos han estado persiguiendo desde entonces (Shockley & Queisser, 1961).

El Nobel de Nakamura y la luz que lo cambió todo

Los semiconductores que generan electricidad a partir de la luz también pueden hacer lo contrario. Los diodos emisores de luz (LED) son uniones p-n que, al polarizarse, hacen que los electrones y los huecos se recombinen y liberan energía en forma de fotones.

Durante décadas, los LED rojos y verdes fueron comunes, pero el reto de la iluminación era el LED azul, pues sin él, era imposible crear luz blanca. El desafío residía en encontrar un material semiconductor con una banda prohibida lo suficientemente ancha como para emitir luz azul de alta energía (Nakamura et al., 1993).

La respuesta llegó con los nitruros de galio (GaN). A principios de la década de 1990, Shuji Nakamura, trabajando en la pequeña empresa japonesa Nichia Chemical, logró avances revo-

lucionarios en el crecimiento de cristales de InGaN/GaN de alta calidad. Su trabajo dio lugar a los primeros LED azules de alta potencia y de doble heteroestructura, como se describe en su artículo de 1993. Este logro, que le valió el Premio Nobel de Física en 2014, no solo dio lugar a la revolución de la iluminación LED de bajo consumo, sino que también sirvió de base para el láser azul que hizo posible el almacenamiento de datos de alta densidad (Blu-ray).

El GaN y otros semiconductores de banda prohibida ancha como el SiC (carburo de silicio) también estaban revolucionando la electrónica de potencia, permitiendo que los dispositivos pudieran trabajar con voltajes y temperaturas mucho más altas que el silicio, necesarios para vehículos eléctricos y redes de energía eficientes

El final de la Ley de Moore y la apertura un nuevo horizonte

A principios de la década de 2020 ya existían transistores de 2-3 nanómetros (apenas 10 átomos de ancho); sin embargo, eran poco fiables. El calor generado por tantos componentes empaquetados también se convirtió en un problema.

La industria se ha visto obligada a cambiar de estrategia. El objetivo ya no es simplemente encoger, sino diversificar. En lugar de hacer chips más rápidos y esperar a que lleguen las aplicaciones, la industria ahora identifica las aplicaciones primero (teléfonos móviles,

supercomputadoras, la “nube”) y luego diseña los chips necesarios para ellas (Waldrop, 2016). Esta nueva filosofía significó integrar funciones más allá del cómputo puro: sensores, gestión de energía y nuevos tipos de memoria, todo ello en un solo paquete enfocado en el sistema completo.

Ahora, el escalado de transistores de silicio, predicho por la Ley de Moore, está alcanzando sus límites físicos y económicos (Jaeger & Blalock), la frontera de la innovación se expande hacia la especialización.

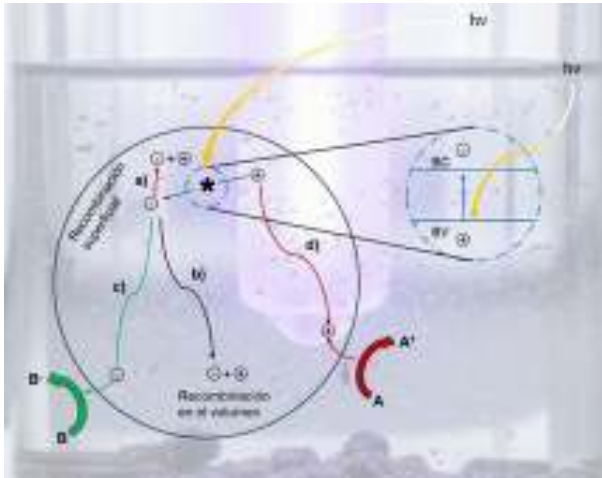


Figura 6. Procesos que ocurren en la interfaz semiconductor-electrolito bajo iluminación.

Modificado del libro de Grela, María Alejandra et al. (2001), CYTED VIII. Eliminación de contaminantes mediante fotocatalisis heterogénea.

Mientras el silicio domina el procesamiento de la información, los semiconductores de banda ancha, como el nitruro de galio (GaN), son la opción para la gestión de la energía (Nakamura et al., 1993). El GaN puede soportar voltajes y temperaturas mucho más altos que el silicio, lo que permite la generación de cargadores rápidos más pequeños, inversores de alta eficiencia para vehículos y redes eléctricas inteligentes más robustas (Baliga, 2013).

Por otra parte, la energía fotovoltaica sigue perfeccionándose. El desafío de convertir eficientemente la luz solar en electricidad, cuya eficiencia máxima teórica fue calculada en 1961, sigue siendo un objetivo central (Shockley & Queisser, 1961). Hoy, las celdas solares de silicio han alcanzado eficiencias que se aproximan a ese límite fundamental, en estudios de laboratorio. Paralelamente, nuevos materiales como las perovskitas demuestran buena eficiencia en el almacenamiento de energía solar (Green et al., 2021).

Finalmente, la cadena de suministro de semiconductores, antes concentrada en Asia y Norteamérica, busca diversificarse. En 2025 se presentó el proyecto “Kutsari, casa de diseño de semiconductores” en Phoenix, Arizona, enfocado en impulsar a Puebla, México, como centro de diseño e innovación en semiconductores. Con el apoyo de la SECIHTI, busca integrar al estado en la cadena global de valor y atraer alianzas con empresas como TSMC, SMIC y NVIDIA (Vázquez, 2025).

Aplicación medioambiental de los semiconductores

Desde los años setenta se consolidó el estudio de la fotocatalisis para la oxidación fotoinducida de contaminantes medioambientales.

Se ha demostrado que las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) convencionales no están diseñadas para eliminar moléculas complejas, lo que genera su acumulación en el medio ambiente.

La Figura 6 esquematiza los procesos químicos que ocurren en una partícula de semiconductor cuando es excitada con luz suficientemente energética. En estas condiciones se generan pares electrón-hueco que pueden formar especies reactivas de oxígeno y reaccionar con especies adsorbidas (Mills & Le Hunte, 1997). Los

pares electrón-hueco que no alcanzan a separarse ni a reaccionar con especies en la superficie se recombinan y la energía se disipa. El proceso neto es la catálisis de la reacción entre el oxidante y el reductor (por ejemplo, OH⁻ y materia orgánica) (Mills & Le Hunte, 1997).

Ciertos semiconductores, como el trióxido de tungsteno (WO₃) o el dióxido de titanio (TiO₂) pueden generar especies químicas altamente reactivas (como los radicales hidroxilos y superóxidos) a partir de la irradiación con luz a determinada longitud de onda. Estas especies pueden atacar y degradar contaminantes orgánicos complejos, convirtiéndolos en especies más biodegradables o llegar a la mineralización.

Conclusiones

La historia de los semiconductores es la historia del dominio humano sobre la frontera de la conductividad eléctrica, desde el tubo de vacío a la era de la información, con la Ley de Moore como su profecía autocumplida. Pero la era de los semiconductores no ha terminado; se está transformando. La innovación ahora reside en la diversificación de potentes circuitos y en la generación de celdas solares ultraeficientes. Sin embargo, el gran reto ya no es la velocidad de cómputo, sino la sostenibilidad.

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 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

GCJ agradece a la SECIHTI por la beca doctoral 4051803.

Referencias

- Baliga, B. J. (2013). Gallium nitride devices for power electronic applications. In *Semiconductor Science and Technology* (Vol. 28, Issue 7). <https://doi.org/10.1088/0268-1242/28/7/074011>
- Bardeen, J., & Brattain, W. H. (1948). The Transistor, A Semi-Conductor Triode. *Physical Review*, 74(2), 230. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.74.230>
- Dennard, R. H., Gaensslen, F. H., Yu, H. N., Rideout, V. L., Bassous, E., & Leblanc, A. R. (1974). Design of Ion-Implanted MOSFET's With Very Small Physical Dimensions. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 9(5), 256–268. <https://doi.org/10.1109/JSSC.1974.1050511>
- Green, M. A., Dunlop, E. D., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N., & Hao, X. (2021). Solar cell efficiency tables (Version 58). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 29(7), 657–667. <https://doi.org/10.1002/ppp.3444>
- IRDSTM Community. (n.d.). IEEE IRDSTM - IEEE IRDSTM. Retrieved November 13, 2025, from <https://irds.ieee.org/component/content/article/8-home/4-what-is-the-irds>
- Jaeger, R. C., & Blalock, T. N. (n.d.). *Microelectronic circuit design, FIFTH EDITION*.
- Kilby, J. S. (1976). Invention of the Integrated Circuit. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 23(7), 648–654. <https://doi.org/10.1109/T-ED.1976.18467>
- Mills, A., & Le Hunte, S. (1997). An overview of semiconductor photocatalysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 108(1), 1–35. [https://doi.org/10.1016/S1010-6030\(97\)00118-4](https://doi.org/10.1016/S1010-6030(97)00118-4)
- Moore, G. E. (1965). Cramping More Components onto Integrated Circuits.
- Nakamura, S., Senoh, M., & Mukai, T. (1993). High-power InGaN/GaN double-heterostructure violet light emitting diodes. *Applied Physics Letters*, 62(19), 2390–2392. <https://doi.org/10.1063/1.109374>
- Shockley, W. (1949). The Theory of p n Junctions in Semiconductors and p n Junction Transistors. *Bell System Technical Journal*, 28(3), 435–489. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1949.d>
- Shockley, W., & Queisser, H. J. (1961). Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells. *Journal of Applied Physics*, 32(3), 510–519. <https://doi.org/10.1063/1.1736034>
- Vázquez, K. (2025, October 17). Puebla presenta Kutsari y fortalece su papel en la industria de semiconductores. *Industria 4.0*. <https://mexicoindustry.com/noticia/puebla-presenta-kutsari-y-fortalece-su-papel-en-la-industria-de-semiconductores>
- Waldrop, M. M. (2016). More than Moore. *Nature*, 530(7589), 144–148. <https://go.gale.com/ps/i.o?p=HRCA&s=w&ssn=00280836&v=2.1&it=r&id=GALE%7CA443132364&sid=googleScholar&linkaccess=fulltext&?p=HRCA&sw=w&issn=00280836&v=2.1&it=r&id=GAL-443132364&sid=googleScholar&linkaccess=fulltext>

Recepción: 10.11.2025

Revisión: 30.11.2025

Publicación: 15.01.2026

<https://orcid.org/0009-0007-3233-9841>

<https://orcid.org/0009-0007-2879-9570>

<https://orcid.org/0000-0002-1252-0527>

USO DE RESIDUOS DE LA PRODUCCIÓN DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) PARA LA FABRICACIÓN DE ADOQUINES

USE OF EXPANDED POLYSTYRENE (EPS) PRODUCTION WASTE FOR THE MANUFACTURE OF PAVING STONES.

Axel Arath Varela Castelan*¹
Magín Idelfonso Torreblanca Ramírez¹
Ignacio Muñoz Máximo²

¹Facultad de Ingeniería Química,
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla,
Ciudad Universitaria,
Jardines de San Manuel,
CP 72570 Puebla, México.

²Laboratorio de Geociencias Aplicadas de la DITCo,
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla,
Ciudad Universitaria,
Jardines de San Manuel, CP 72570 Puebla, México.

Correos:

*axel.varela@alumno.buap.mx
magin.torreblanca@correo.buap.mx
ignacio.munozmax@correo.buap.mx

Resumen

Se propone una alternativa técnica y sustentable ante la problemática ambiental derivada de los desechos industriales del EPS, tales como la perla contaminada durante las etapas iniciales del proceso y el polvo fino generado en las líneas de producción. Este residuo, al no ser biodegradable y al tener un alto volumen de producción, representa un desafío en su disposición final; sin embargo, también ofrece un área de oportunidad para su aprovechamiento en materiales de construcción, gracias a sus propiedades térmicas y acústicas. Al utilizar estos residuos y la disolución en solventes compatibles, se emplearon como agregados adicionales en morteros de concreto para la elaboración de adoquines de jardín. El uso de diferentes solventes comerciales según su compatibilidad. El solvente utilizado fue el d-limoneno como la mejor opción, y gasolina por su baja accesibilidad, asimismo, se seleccionaron agregados alternativos que también forman parte de residuos industriales como: grava, sílica y garnet, materiales que ofrecen una buena dureza y baja porosidad. Se siguieron normas ASTM e ISO para ensayos de compresión, absorción de agua y durabilidad, así como adaptaciones de estas normas en otros materiales para pruebas complementarias en los adoquines.

Palabras clave: Adoquines, D-limoneno, poliestireno expandido (EPS), reciclaje de plásticos, residuos industriales.

Abstract

A technical and sustainable alternative is proposed to address the environmental problems caused by EPS industrial waste, such as the beads that become contaminated during the initial stages of the process and the fine dust generated on production lines. This waste, which is not biodegradable and is produced in large volumes, poses a challenge in terms of its final disposal; however, it also offers an opportunity for use in construction materials thanks to its thermal and acoustic properties. By using this waste and dissolving it in compatible solvents, it was used as an additional aggregate in concrete mortar for the production of garden paving stones. Different commercial solvents were used according to their compatibility. The solvent used was d-limonene as the best option, and gasoline due to its low accessibility. Alternative aggregates that are also part of industrial waste were selected, such as gravel, silica, and garnet, materials that offer good hardness and low porosity. ASTM and ISO standards were followed for compression, water absorption, and durability tests, as well as adaptations of these standards to other materials for complementary tests on the paving stones.

Keywords: Paving stone, D-limonene, expanded polystyrene (EPS), plastic recycling, industrial waste.

Introducción

La gestión de residuos sólidos urbanos es un desafío ambiental global, destacando el poliestireno expandido (EPS) debido a su gran volumen de producción y su difícil degradación, lo que provoca contaminación en suelos y cuerpos de agua (Andrady, 2015; Hopewell et al., 2009). Aunque el poliestireno expandido (EPS) ofrece buenas propiedades, su carácter no biodegradable y la generación de residuos industriales – perlas contaminadas, scrap y polvo de poliestireno – representan un problema ambiental significativo (Awaja & Pavel, 2005).

Varias investigaciones han demostrado que la disolución del poliestireno expandido en solventes orgánicos permite su transformación en productos de valor agregado, aunque la elección de los solventes y la viabilidad técnica de los productos siguen siendo retos importantes (Al-Salem et al., 2009). En este estudio se propone utilizar los desechos generados en las etapas de producción del poliestireno expandido disueltos con solventes orgánicos como agregados en adoquines, evaluando su factibilidad técnica y ambiental, generando un producto de valor agregado para la industria de la construcción, cumpliendo con normas de desempeño y criterios de sostenibilidad.

El objetivo principal es desarrollar y evaluar la reutilización del polvo y perlas contaminadas de poliestireno en adoquines para jardinería o decorativos, analizando su resistencia mecánica, absorción de agua y estabilidad frente a condiciones climáticas externas, reduciendo la generación de residuos industriales ofreciendo soluciones constructivas sostenibles.

Identificación y caracterización del solvente, agregados y aditivos

La naturaleza apolar del poliestireno exige solventes poco polares para su disolución. En la evaluación realizada, el d-limoneno destacó por su eficiencia y menor riesgo ambiental, mientras que la gasolina, aunque económica y

efectiva, presentó mayores peligros operativos. Por ello, el d-limoneno se seleccionó como solvente principal y la gasolina como alternativa.

En cuanto a los agregados, se eligieron materiales provenientes de desechos industriales. El garnet y la grava de sílica aportaron alta dureza, estabilidad y buena compatibilidad con la matriz cementicia. Además, se incorporó polvo de poliestireno como agregado ligero en proporciones superiores al 5 % del peso del cemento para valorizar este residuo.

Pruebas de densidad aparente

Se determinó la densidad del polvo de poliestireno y la perla contaminada mediante probetas de 10 ml, pesadas con balanza analítica, tomando como referencia la norma ISO 697-1.

Tabla 1. Datos experimentales de la perla contaminada y el polvo de poliestireno para la determinación de su densidad aparente.

Parámetro	Polvo de poliestireno	Perla contaminada	Unidad
Masa de polvo de poliestireno (m)	a) 5.4650 b) 5.4652 c) 5.4649	a) 6.2465 b) 6.2462 c) 6.2460	g
Volumen de la probeta de medición (V)	10	10	ml
Densidad aparente calculada (ρ)	a) 0.54650 b) 0.54652 c) 0.54649	a) 0.6246 b) 0.6246 c) 0.6246	g/ml
Densidad promedio	0.5465	0.6246	g/ml

Nota. Elaboración propia

El valor de la densidad aparente para el polvo de poliestireno fue 0.5465 g/ml en comparación con la perla contaminada 0.6246 g/ml el polvo representa un valor menor de densidad, la diferencia puede deberse a la morfología de las partículas, así como del grado de compactación del material dentro de la probeta.

Cálculo de proporciones y preparación de mortero

Se establecieron relaciones polímero-solvente de 1:1 a 1:3 para obtener una viscosidad adecuada. La disolución del polímero se incorporó manualmente a una mezcla de cemento, agregados finos y gruesos y agua.

Con esta mezcla se elaboraron probetas cilíndricas conforme a ASTM C39 (15 × 30 cm), las cuales se curaron 28 días bajo saturación controlada.

Los cálculos en Excel se organizaron a partir de volúmenes, masas y proporciones de disolución, ajustando la cantidad de solvente y el volumen final de mortero. Cuando se añadió un aditivo en polvo (2-5 % del peso del cemento), se modificó la relación agua-material.(Tabla 2)

El peso estimado del adoquín se obtuvo calculando la densidad global de la mezcla a partir de los volúmenes y densidades individuales. El d-limoneno presentó una densidad de 0.7671 g/mL, utilizada como referencia para estimar las cantidades iniciales de solvente y polímero. Con el volumen de la pieza y la densidad total, se estimó un peso de 11.7806 kg, con el cual se definieron las cantidades necesarias de cada componente. (Tabla 3,4,5)

Se elaboraron también tres probetas adicionales empleando gasolina disuelta con perlas contaminadas de poliestireno, aplicando la misma metodología y modificando únicamente los datos del solvente y el polímero.



Figura 2. Identificación de probetas para prueba ASTM C39
Nota. Elaboración propia

Tabla 2. Proporciones estándar para la fabricación del mortero.

Proporciones	[Kg]
Cemento	1
Garnet	2
Grava sílica 1/8	3
Mezcla polímero/solvente	0.15
Agua	0.6
Colorante	0.035
Total	6.75

Nota. Elaboración propia

Tabla 3. Calculo para determinar la densidad total de la mezcla.

Densidad [g/ cm ³]	Material	Volumen [cm ³]	Masa total	Volumen Total [cm ³]	Densidad promedio
3.15	Cemento	317.4603	6.75	3182.7499	2.1188
2.4	Garnet	833.3333	6750		
2.5	Grava sílica 1/8	1200			
1	Agua	600			
0.648	Mezcla polímero/solvente	234.9562			
0.5465	Polímero	239.4	262	410.4	0.638
0.75	Gasolina	171			

Nota. Elaboración propia

Tabla 4. Determinación para las cantidades de polímero/solvente de acuerdo con la relación

Mezcla polímero/solvente		Relación 1:1.4
Densidad del polímero	0.5465	g/ml
Densidad solvente (gasolina)	0.7671	g/cm ³
Cantidad solvente	171	ml
Peso D-limoneno	131.1741	gr
Cantidad de polímero	239.4	ml
Peso del polímero	130.8321	gr
Peso total	262	gr

Nota. Elaboración propia

Tabla 5. Cantidades finales por cada pieza fabricada

Peso total	11.7806	kg	11780.5853	gr
Cemento	1.7453	kg	1745.2719	gr
Garnet	3.4905	kg	3490.5438	gr
Grava sílica 1/8	5.2358	kg	5235.8157	gr
Mezcla polímero/solvente	0.2618	kg	261.7907	gr
Colorante	-	kg	-	gr
Agua	1.0472	L	1047.1631	ml

Nota. Elaboración propia

Pruebas de compresión

La norma ASTM C39 requiere que las probetas se encuentren en un estado de humedad controlada, con la superficie seca, pero con saturación interna previa al ensayo. Para cumplir esta condición, dos de las probetas se sumergieron en agua durante 15 minutos antes de aplicar la carga. Posteriormente, cada probeta fue ensayada bajo carga axial constante en una máquina universal CMSUTM-600B hasta alcanzar el fallo mecánico, registrándose la carga máxima soportada.

Tabla 6. Resultados carga-desplazamiento

Probeta	Carga máxima [kN]	Desplazamiento máximo [mm]
(1) Polvo + D-limoneno	252.05	12.6
(2) Polvo + D-limoneno	132.95	30.1998
(3) Polvo + D-limoneno	143.17	14.35
(1) Perla + gasolina	247.48	23.2499
(2) Perla + gasolina	132.53	7.95
(3) Perla + gasolina	140.26	13.5

Nota. Elaboración propia

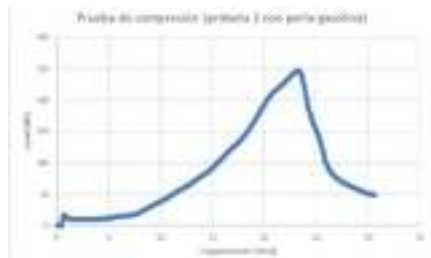
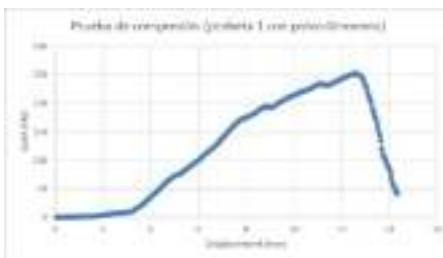
Se compararon las probetas elaboradas con polvo de poliestireno y con perla contaminada, para evaluar su resistencia a compresión respecto al valor de referencia de 24.5 MPa. La resistencia media de las seis probetas fue de 9.88 MPa para el desempeño mecánico moderado. Considerando únicamente las probetas (1) con polvo disuelto en d-limoneno y (1) con perla disuelta en gasolina —ambas sometidas al acondicionamiento de humedad indicado por la norma—, la resistencia media obtenida fue de 14.13 MPa.

Tabla 7. Resultados de la resistencia a la compresión de cada probeta

Probeta	Área transversal [m ²]	Resistencia a la compresión [MPa]
(1) Polvo + D-limoneno	0.01767	14.26
(2) Polvo + D-limoneno	0.01767	7.52
(3) Polvo + D-limoneno	0.01767	8.10
(1) Perla + gasolina	0.01767	14.00
(2) Perla + gasolina	0.01767	7.50
(3) Perla + gasolina	0.01767	7.93

Nota. Elaboración propia

Figura 3. Graficas carga-desplazamiento



Nota. Elaboración propia

Ensayos de resistencia a cambios climáticos

Se elaboraron adoquines de geometría hexagonal (5 cm por lado y 4.5 cm de altura) se utilizó una mezcla homogénea de polímero disuelto y

pigmento. Tras 28 días de curado, se sometieron a ciclos térmicos acelerados en una cámara PV1200, con variaciones de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ y

control de humedad. Estos ciclos, que incluyeron fases de calentamiento, enfriamiento y estabilización, permitieron evaluar su durabilidad térmica bajo condiciones simuladas de exposición real. (Figura 1)

Se introdujo un primer adoquín a la cámara de cambios climáticos, después de 4 días dentro de la cámara el adoquín presentó una anomalía que provocó que la prueba se detuviera, se notó la presencia de burbujas superficiales que salían de dentro del adoquín. (Figura 4)

Las burbujas esféricas observadas inicialmente sugieren una reexpansión o volatilización parcial de fracciones de gasolina atrapadas en el poliestireno, movilizadas térmicamente bajo ciclos extremos. También podrían originarse por una compactación insuficiente o por una mezcla poco homogénea entre el polímero y el solvente, generando vacíos que se expanden a altas temperaturas y se rigidizan al enfriarse.

Para confirmar el comportamiento del material, se ensayó un segundo adoquín con las mismas proporciones en la cámara PV1200, capaz de reproducir el protocolo de la norma ISO 16752-4. El adoquín estuvo en exposición durante 15 días, completando 30 ciclos de 12 horas.

Tras la inspección visual se observó:

- Sin grietas ni fisuras
- Sin cambios de coloración.
- Sin disgregación ni desprendimiento.
- Geometría estable.
- Sin migración del poliestireno.
- Pérdida de masa del 4.37 % (de 704.3 g a 670.1 g).

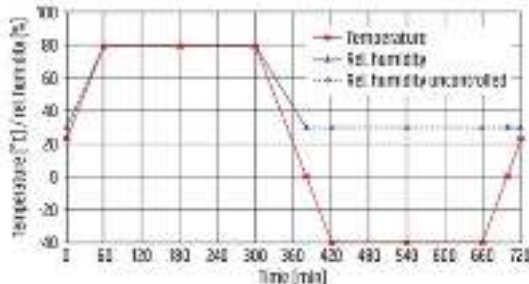


Figura 1. Ciclos de ensayo mediante PV1200

Nota: Volkswagen PV1200 Standard - Análisis de Ascott

<https://www.pv1200.com/>



Figura 4. Presencia de burbujas en el adoquín después de 4 días de prueba en cámara de cambios climáticos.

Nota. Elaboración propia

Ensayo de absorción de agua

Los adoquines se secaron en un horno entre 100 y 115 °C durante 24 h hasta alcanzar una masa constante. Posteriormente, se sumergieron en agua a temperatura ambiente durante 24 h para determinar la absorción y la porosidad del material. Para el cálculo de estos parámetros se registró el peso inicial en seco, el peso

saturado en agua y el peso en condición de saturación superficial seca.

Con los datos obtenidos (véase tabla 8) se calculó el porcentaje de absorción de agua, la densidad aparente seca y la densidad en estado saturado superficialmente seco.

Tabla 8. Datos experimentales de la prueba de absorción de agua ASTM C140

Etapa	Tiempo	Temperatura [°C]	Peso [g]
Peso inicial	-	23	670.1
Horno (24 h)	24	110	644.58
+ 2h	26	110	645.04
+ 2h	28	110	644.80
+ 2h	30	110	646.86

Nota. Elaboración propia

Tabla 9. Resultados del ensayo de absorción de agua

Absorción (%)	Densidad aparente seca	Densidad en estado saturado seco
9.29	1.823 g/cm ³	1.993 g/cm ³

Nota. Elaboración propia

Para la resistencia al impacto de material (adoquín)

Se evaluó la resistencia al impacto mediante un ensayo de caída de bola adaptado de las normas ASTM D4272 y EN ISO 13036-5. Se utilizó una bola de acero templado de 833 g, liberada desde 0.70 m sobre una superficie rígida y no absorbente. La energía de impacto calculada fue de 5.714 J. Se aplicaron seis impactos distribuidos sobre la superficie del adoquín y ninguno produjo daño estructural; únicamente se observó una ligera marca superficial sin formación de grietas ni fisuras, reportando adecuada capacidad de absorción de energía. El desgaste por abrasión se determinó siguiendo las normas ASTM C944, ASTM C779/C779M y UNE-EN 1338 (Anexo D), empleando una lija de carburo de silicio para evaluar la pérdida de masa del adoquín bajo condiciones normalizadas de abrasión.

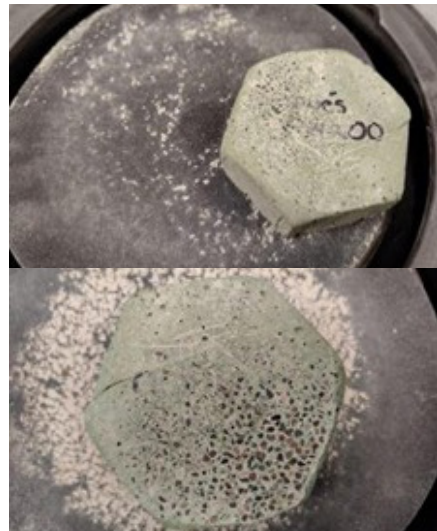


Figura 5. Adoquín después de 500 ciclos de lijado

Nota. Elaboración propia

Superficie del ensayo rígida, no absorbente

La pérdida de masa promedio fue de 1.08 gramos lo que representa un 0.16% de pérdida total global de toda la pieza, este valor es relativamente bajo para un adoquín que fue expuesto a cambios climáticos extremos.

Criterios derivados de la norma UNE-EN 1338, Anexo D, el porcentaje obtenido se encuentra por debajo del 1% sugerido como límite para pavimentos de concreto en aplicaciones no industriales.

Se realizó un análisis visual de un fragmento del adoquín con el propósito de evaluar la calidad microestructural de la matriz solvente-polímero-cemento. El examen se enfocó en identificar defectos potenciales —vacíos, porosidad excesiva, fisuras o segregación del polímero— que pudieran afectar el desempeño mecánico del material. Este análisis permitió valorar la integridad de la interfaz y la uniformidad en la integración de los componentes.

Tabla 10. Condiciones para la prueba de abrasión por fricción

Parámetro	Valor
Tipo de abrasivo	Lija de carburo de silicio, grano #80
Tipo de equipo	Plataforma rotatoria
Velocidad de rotación	300 rpm
Duración del ensayo	100 segundos (equiv. 500 ciclos)
Carga aplicada	Presión controlada manualmente
Condición de la muestra	Secada a 105 °C durante 24 horas
Medio de fricción	Seco (sin lubricación)

Nota. Elaboración propia

Tabla 11. Resultados del ensayo de abrasión

Ensayo	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Pérdida de masa (g)	Pérdida porcentual	Observaciones
1	673.5	672.42	1.08	0.160%	Leve opacidad superficial, sin exposición del polímero visible
2	672.42	670.98	1.44	0.214%	Zonas de desgaste visibles
3	670.98	670.26	0.72	0.107%	Textura porosa

Nota. Elaboración propia

Imagen microscópica a una magnificación x5.

A 5×, la matriz cementante pigmentada se observó continua, con agregados (grava sílica y garnet) distribuidos uniformemente y bien

anclados. Solo se identificaron poros aislados de forma redondeada, sin evidencia de segregación del polímero.



Figura 6. Microestructura de la matriz polímero/sovente-cemento en un aumento x5 Nota. Elaboración propia

Imagen microscópica a una magnificación x20

A 20×, la interfaz cemento-polímero fue continua y sin desadherencias, con una compactación



densa y partículas de garnet sin microfracturas. No se detectaron restos de polímero sin disolver.

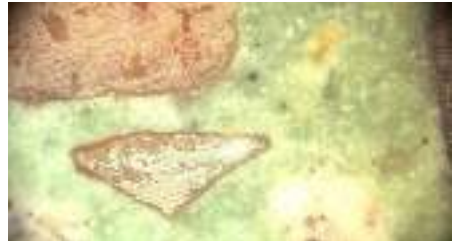


Figura 7. Microestructura de la matriz polímero/solvente-cemento en un aumento x20

Nota. Elaboración propia

Imagen microscópica a una magnificación x50

A 50×, se visualizaron partículas de pigmento encapsuladas sin afectar la continuidad de la



matriz. No se observaron microfisuras, indicando una buena calidad Microestructural.



Figura 8. Microestructura de la matriz polímero/solvente-cemento en un aumento x50

Nota. Elaboración propia

La resistencia química de los adoquines se evaluó conforme a la norma ASTM C267-20, exponiendo las muestras durante 7 días a tres agentes: ácido clorhídrico al 5 %, hidróxido de sodio al 5 % y cloruro de sodio al 3.5 %. Este ensayo permitió valorar su estabilidad mecánica, química y superficial frente a ambientes agresivos.

Tras las 168 horas de exposición, las probetas se lavaron con agua desionizada y se dejaron secar durante una hora. Las soluciones no se renovaron durante el ensayo, y únicamente el ácido clorhídrico se mantuvo cubierto para

minimizar su volatilidad. Las pruebas se realizaron bajo condiciones controladas y dentro de una campana de extracción para garantizar seguridad experimental.



Figura 9. Ensayo de resistencia química durante 7 días

Nota. Elaboración propia

Tabla 12. Resultados de pérdida de masa

Solución	Peso inicial (g)	Peso final (g)	m (g)	m (%)
HCl 5%	114.7508	92.6001	-22.1507	-19.3033%
NaOH 5%	93.9210	90.7396	-3.1814	-3.39%
NaCl 3.5%	167.0297	165.9024	-1.1273	-0.67%

Nota. Elaboración propia



Figura 10. Muestras del ensayo química transcurridos los 7 días

Nota. Elaboración propia

El fragmento expuesto a HCl al 5 % presentó el mayor deterioro, con una pérdida de masa del 19.3 %, desmoronamiento estructural y formación de depósitos sólidos, evidenciando un daño severo en la cohesión. Este comportamiento se explica por los mecanismos clásicos de ataque ácido en materiales cementicios: disolución de la portlandita [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], descomposición del gel C-S-H —responsable de la resistencia mecánica— y lixiviación del calcio estructural. La combinación de estos procesos genera una matriz altamente porosa e incapaz de mantener unidos los agregados.



Figura 11. Muestra deteriorada por HCl

Nota. Elaboración propia

En la solución de NaOH al 5 %, la pérdida de masa fue significativamente menor (3.39 %) y no se observaron daños visibles, lo que sugiere que el medio alcalino afecta principalmente de forma superficial. Finalmente, la muestra expuesta a salmuera al 3.5 % mostró la menor pérdida de masa (0.67 %) y ausencia total de deterioro estructural.

En conjunto, los resultados indican que los adoquines son altamente vulnerables en ambientes ácidos, tolerantes en medios alcalinos y estables frente a condiciones salinas o marinas.

Preparación de adoquines final y evaluación económica

Se fabricaron adoquines hexagonales de 8 cm de lado y 5 cm de altura. Se ajustaron proporciones según ensayos previos para garantizar propiedades óptimas, se evaluó el costo de producción incluyendo solventes, materiales, energía y mano de obra.

Se comparo con adoquines tradicionales considerando eficiencia y sostenibilidad

permitiendo identificar la viabilidad técnica y económica del uso de los residuos generados en líneas de producción del poliestireno expandido (EPS).

Para la elaboración de los adoquines finales se optó por utilizar una relación polímero – solvente de 1:1.(Tabla 13, 14)

La comparativa económica de adoquines de concreto hexagonales fabricados a partir de elementos reciclados, particularmente polvo de estireno o perla contaminada disuelto en gasolina o D-limoneno contra 5 marcas de adoquines tradicionales disponibles en México.

El adoquín experimental tiene un costo unitario de 40-50% en comparativa con alternativas comerciales, en cuestión de costos por m² este valor se triplica en comparación a las demás alternativas debido a las dimensiones de cada adoquín, la resistencia mecánica propuesta es suficiente para usos en jardinería y decoración que no requieran soportar grandes cargas continuas, siendo inferior a un concreto estándar estructural >20 MPa.

Su absorción de agua supera lo ideal (<7%), pero está dentro de lo permisible para aplicaciones no estructurales como decorativo, paisajismo y senderos peatonales de baja carga, que de acuerdo con Neville (2011) es de ≤10-12%.

Tabla 13. Determinación para las cantidades de polímero/solvente de acuerdo con la relación

Mezcla polímero/solvente		Relación 1:1
Densidad del polímero	0.5465	g/ml
Densidad solvente (gasolina)	0.75	g/cm ³
Cantidad solvente	30.5	ml
Peso Gasolina	22.875	gr
Cantidad de polímero	30.5	ml
Peso del polímero	16.6682	gr
Peso total	39.5433	gr

Nota. Elaboración propia

Tabla 14. Cantidades finales por cada pieza fabricada

Peso total	1.7635	kg	1763.5188	gr
Cemento	0.2613	kg	261.3	gr
Garnet	0.5225	kg	522.5	gr
Grava sílica 1/8	0.7838	kg	783.8	gr
Mezcla polímero/solvente	0.0392	kg	39.2	gr
Colorante	-	kg	-	gr
Agua	0.1568	L	156.8	ml

Nota. Elaboración propia

Tabla 15. Evaluación comparativa

Propiedad	Experimental	Superblock	Tabicel (Venecia)	Preconcretos (AR-8)	Verdecreto	Dublock
Dimensiones	8x14x5 Hexagonal	15X15X6 Cuadrado	20x10x6 Rectángulo	20x10x6 Rectángulo	20x10x6 Rectángulo	20x10x6 Rectángulo
Resistencia a la compresión	14.13 MPa	29.4 MPa	39.2 MPa	15 MPa	24.5 MPa	19.6 MPa
Absorción de agua	9.29%	-	-	<8%	25.5%	-
Densidad aparente seca (g/cm ³)	1.823	-	-	-	1.7	-
Costo unitario	\$20	\$22	\$18	\$21	\$17	\$20
Costo por m ² estimado	\$1869	\$265.0	\$216.4	\$252.5	\$204.5	\$240

Nota. Elaboración propia

Conclusiones

A través de estas mezclas de materiales orgánicos y materiales comerciales se permite tener y ofrecer nuevos materiales, empleando los residuos generando una nueva disposición y uso e incrementando la vida útil de materiales residuales.

Los resultados muestran que los residuos de poliestireno expandido —tanto en polvo como en perlas contaminadas— pueden integrarse adecuadamente en morteros junto con agregados no convencionales como grava sílica y garnet, ambos provenientes de desechos industriales. Los adoquines obtenidos alcanzaron una resistencia media de 14.3 MPa, dentro del rango de materiales decorativos no estructurales según normas como la NTG 41017 (Clase C), adecuados para senderos y jardinería, aunque por debajo de los 35 MPa requeridos por ASTM C936 para pavimentos estructurales.

La absorción de agua fue de 9.29 %, superior al límite de 7 % para adoquines estructurales (NMX-C-414-ONNCCE), pero dentro del rango

permitido para uso decorativo según UNE EN 1338 (≤ 12 %). El desempeño térmico fue estable durante 30 ciclos de -40 °C a 80 °C, indicando buena resistencia a choques térmicos y confirmando la compatibilidad entre el cemento, los agregados minerales y el polímero disuelto.

En términos ambientales y económicos, la propuesta permite valorizar residuos plásticos y minerales de difícil disposición, con potencial de escalamiento industrial. En conjunto, estos resultados respaldan el uso de estos adoquines en aplicaciones urbanas y de paisajismo donde no se requiera capacidad estructural elevada.

El procedimiento que se plantea en este artículo resulta prometedor para ser implementado en pruebas con diversos materiales como lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) y alternativas de concreto de alta resistencia, lo anterior permitirá establecer un antecedente de innovación y caracterización en la búsqueda de uso a materiales residuales o invasores

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 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 a la Facultad de Ingeniería Química y al Laboratorio del área de Geociencias aplicadas DITCo de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Referencias

- Agilent Technologies. (2023). Applications in polymeric materials. Recuperado de [agilent.com](https://www.agilent.com)
- American Concrete Institute (ACI). (2019). Concrete paving unit standard practices. Detroit, MI: ACI Publications.
- ASTM International. (1999). ASTM C39/C39M-99: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. ASTM International.
- ASTM International. (2025). ASTM C944: Standard test method for abrasion resistance of concrete by sandblasting. ASTM International.
- ASTM International. (2017). ASTM C140: Standard methods for sampling and testing concrete masonry units and related units. ASTM International.
- ASTM International. (2020). ASTM C39/C39M-99: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. ASTM International.
- ASTM International. (2021a). ASTM C642-21: Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. ASTM International.
- ASTM International. (2019). ASTM C779/779M-19: Standard Test Method for Abrasion Resistance of horizontal Concrete Surfaces. ASTM International.
- ASTM International. (2010). ASTM D4272-10: Standard Test Method for Impact Resistance of ThermoSet Laminates. ASTM International.
- ASTM International. (2020). ASTM C267-20: Standard Test Method for Chemical Resistance of Mortars. ASTM International.
- ASTM International. (2012). ASTM C944/C944-99: Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortars Surfaces by the Rotating-Cutter Method. ASTM International.
- UNE-EN 1338. (2004). Concrete paving blocks – Requirements and test methods. Asociación Española de Normalización
- Banthia, N., & Gupta, R. (2006). Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete. *Cement and Concrete Research*, 36(7), 1263-1267.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *Materials science and engineering: An introduction* (10a ed.). Wiley.
- Cerablast. (s. f). Arena de granate (garnit)-Cerablast. Recuperado de <https://cerablast.com/es/arena-de-granate-garnit7>
- CEmix. (s. f). Ficha técnica color para cemento. CEMIX
- CTS Clima Temperature System GmbH. (2022). Operating manual – Climate test chamber PV1200. CTS GmbH.
- Gaggino, R., & López, M. A. (2019). Reutilización de residuos plásticos en materiales de construcción: Estado del arte y análisis comparativo de la Construcción, 18(2), 278-291. <https://doi.org/10.7764/RDLC.18.2.278>
- García, J., & Pérez, M. (2021). Innovación en materiales para pavimentos urbanos. *Journal of Urban Engineering*, 35(2), 123-134.
- González, L., & Torres, P. (2021). Estudio de la resistencia mecánica en adoquines reforzados con EPS. *International Journal of Civil Engineering*, 29(3), 63-70.
- Hamis, S. H. (Ed.). (2000). *Handbook of polymer degradation* (2a ed.). Marcel Dekker.
- Herrera, J., & Muñoz, A. (2020). Innovación en materiales de construcción: Uso de poliestireno expandido en adoquines de concreto. *Journal of Sustainable Construction*, 19(2), 42-50.
- Hormipisos. (s. f). Adoquines: Elegancia duradera en cada paso. Recuperado de <https://www.hormipisos.com>
- ISO. (2010). ISO 16750-4: Road vehicles – Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment – part 4: Climatic loads. International Organization for Standardization.
- ISO 697-1. (1981). Rubber, raw – Determination of density – Part 1: General test method. Geneva: International Organization for Standardization.
- Idesa Petroquímica - Perla de EPS. (s. f). Recuperado de <https://www.idesapetroquimica.com/es>
- Jones, L., Smith, R., & Taylor, P. (2020). Recycled materials in paving systems. *Construction Materials Review*, 28(4), 89-97.

- Jones, M. R., Waghorn, R., & Soutsos, M. N. (2020). Use of EPS waste in concrete and construction materials. *Construction and Building Materials*, 234, 117293.
- Kumar, V., Gupta, S., & Rao, A. (2021). Utilization of expanded polystyrene in concrete paving blocks. *Sustainable Construction Research*, 19(3), 67-75.
- Malhotra, V. M., & Carino, N. J. (2004). *Handbook on nondestructive testing of concrete* (2a ed.). CRC Press.
- Medina, C., de Rojas, M. I. S., & Frías, M. (2016). Reuse of ceramic waste in eco-efficient concrete. *Journal of Cleaner Production*, 112, 399-406.
- Metha, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (4a ed.). McGraw-Hill Education.
- Méndez, J., Silca, T. (2022). Resistencia y degradación de adoquines de EPS en entornos externos. *Building and Environment Journal*, 28(3), 89-95.
- Montgomery, D. C. (2020). *Design and analysis of experiments* (10a ed.). Wiley
- Mynt, S., Zakaria, M. S. B., & Ahmed, K. R. (2010). Paints based waste expanded polystyrene. *Progress in Rubber, Plastic and Recycling Technology*, 26(1), 21-30. <https://doi.org/10.1177/147776061002600120>
- NAPCOR. (2021). *Expanded polystyrene recycling – A review of methods and applications*. National Association for PET Container Resources.
- Neville, A. M. (2011). *Propertires of concrete* (5a ed.). Pearson Educational Limited.
- ONNCE. (2010). NMX-C-263-ONNCE: Determinación de masa específica, absorción y vacíos. ONNCE.
- ONNCE. (2013). NMX-C-036-ONNCE: Compresión de adoquines. ONNCE

Recepción: 30.10.2025

Revisión: 30.12.25

Publicación: 15.01.2026

<https://orcid.org/0000-0001-8394-8398>

<https://orcid.org/0000-0002-3222-6624>

<https://orcid.org/0000-0002-3393-610X>

HABLEMOS DE CURADURÍA DE CONTENIDOS

LET'S TALK ABOUT CONTENT CURATION

Claudia Dayana Pérez Ruíz^{1*}

Ricardo Villegas Tovar²

Josefina Guerrero García³

¹Doctorado en Sistemas y Ambientes Educativos.

Facultad de Ciencias de la Electrónica

²Facultad de Ciencias de la Electrónica,

Director del Centro de Educación Internacional (VIEP- BUAP)

³Profesora investigadora titular A en la Facultad de Ciencias de la Computación (BUAP) y

coordinadora del Doctorado en Ingeniería del Lenguaje y del Conocimiento (LKE),

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Correos:

bve230880@viep.com.mx

ricardo.villegas@correo.buap.mx

josefina.guerrero@correo.buap.mx

Resumen

El presente artículo de divulgación científica tiene por objetivo dar a conocer ¿qué es la curaduría de contenidos (CC)?, señalando su importancia en el advenimiento de la sociedad de la información, buscando comprender sus ventajas y sus objetivos. Se escribe acerca de quiénes son aquellos que hacen la curaduría de contenidos, las habilidades que deben poseer y los diferentes modelos que existen para este propósito. Así como los modelos que se utilizan, buscando responder a la pregunta ¿cuáles son los nuevos recursos que se utilizan para curar?, desde plataformas digitales hasta el uso de la Inteligencia Artificial. A lo largo del artículo se responderán a estas preguntas a través de diferentes ejemplos.

Palabras clave: Alfabetización informacional, Gestión del conocimiento, Industria de la información, Gestión de la Información.

Abstract

This scientific article aims to explain what content curation (CC) is, highlighting its importance in the advent of the information society and seeking to understand its advantages and objectives. It discusses who content curators are, the skills they must possess, and the different models that exist for this purpose. It also discusses the models that are used, seeking to answer the question: what are the new resources that are used for curation?, from digital platforms to the use of Artificial Intelligence. Throughout the article, these questions will be answered through different examples.

Keywords: Information literacy, knowledge management, information industry, information management.

Introducción

En las siguientes páginas el lector encontrará aspectos fundamentales sobre la curaduría de contenidos. El objetivo es dar a conocer elementos que permitirán ser puestos en práctica. Entendiendo la curaduría como un conjunto de procesos que permiten filtrar contenidos, con el objetivo de recuperar aquella información que sea de calidad. El exceso de información que continuamente recibimos de internet es desmedido, sobre todo en la actualidad, en la sociedad de la información, donde la información que se posee ha generado un fenómeno conocido como infoxicación, el cual es la información que se produce en demasía y que debido a su exagerada producción es difícil de organizar (Cornella, 2013)

Otra consecuencia del exceso de información es que aquella que se genera en la actualidad

produce en nosotros una fuerte sensación de incertidumbre, debido a que para todos es difícil saber qué información es verdadera y cuál no lo es. Nos llegamos a preguntar en repetidas ocasiones: ¿cómo saberlo? Incluso en algunas ocasiones, sin saber cómo hacerlo, encontramos algún dato y aunque no tengamos certeza de su veracidad, estamos tentados a compartirlo. Es en esa incertidumbre entre veracidad y falsedad, en donde se puede acudir a la curaduría de contenidos.

En este artículo se trata de buscar dar a conocer qué es la curaduría de contenidos (CC), como una solución a la problemática planteada; además, se busca compartir cuál es su utilidad ante la información que se presenta día con día, así como, quiénes son aquellos que la utilizan, sus beneficios y las formas en las que se puede realizar.

Desarrollo

Panorama mundial

Al indagar sobre la cantidad de información que se produce de manera digital en el panorama mundial, se encontró que a través de distintas herramientas

en línea sobre la medición de la cantidad de datos que se suben de manera instantánea. Páginas como <https://spacelift.io/blog/how-much-data-is-generated-every-day> arrojan la cantidad de datos que se suben a la red en bytes, en julio de 2025, siendo esta de 2,5 trillones de bytes de datos, otro ejemplo se encuentra en el navegador de Google cuando se señala cuánta información fue encontrada sobre un determinado tema en cierto tiempo.

El ejemplo anterior es una muestra de la cantidad de información que surge mediante internet y que es necesaria que sea seleccionada y organizada para que aquella que se comparta sea la más relevante.

Y entonces, ¿Qué es la curaduría de contenidos y para qué sirve?

La curaduría de contenidos se puede entender como la evaluación que se hace de aquella información que se produce en internet o de manera digital con el fin de elegir y ordenar aquella que sea más pertinente a nuestra búsqueda, para así poder encontrar y compartir aquella información que sea de calidad. Otra definición la podemos encontrar en otros autores, como por ejemplo la dada por Juárez, Torres y Herrera (2017) quienes señalan que la curaduría de contenidos permite conjuntar una serie de pasos como la búsqueda y el filtrado de lo obtenido mediante internet para que dichos resultados se puedan administrar de mejor forma.

Ahora bien, ¿Para qué sirve la curaduría de contenidos? Responderemos que su relevancia está en organizar la información debido a la innegable

cantidad que se produce diariamente en internet. Sin embargo, cabe y es preciso señalar que la curación de contenidos filtra la información que de manera digital se encuentra, es decir, jerarquiza

la información en orden de importancia, pudiendo así obtener la información que se ajusta con mayor precisión a la búsqueda y desechando aquella que no es útil o verdadera en el tema seleccionado.



Figura 1. Búsqueda de información en medios digitales

Esta foto de Autor desconocido está bajo licencia CC BY-SA-NC <https://rincondelbibliotecario.blogspot.com/2016/07/que-es-curacion-de-contenidos-y-para.html>

¿Qué es un curador de contenidos y por qué es necesaria la curación de contenidos?

Good (2017) señala que los curadores de contenido son expertos que brindan confianza debido a que permiten gestionar de manera adecuada la gran cantidad de información que surge en la actualidad. Es decir, un curador de contenidos debe brindar certeza de la información debido a que necesita poseer conocimientos del tema que va a curar.

Godoy (2017) considera que el curador de contenidos lleva a cabo distintas tareas entre las que se encuentran: extraer el mejor contenido de diferentes fuentes, filtrar la información según su criterio personal y agregar valor al contenido encontrado, a partir de la organización de este.

La necesidad de la curación de contenidos radica en el hecho de que aquellos que se involucran con el uso del internet requieren discriminar la información que se produce, esto es necesario

para poder adquirir información que sea cierta y se ajuste con la búsqueda, ya que se han dado casos en donde la información obtenida a partir de una búsqueda puede ser falsa y sobre todo compartida generando con ello diferentes problemáticas, un ejemplo de ello se visualizó durante la pandemia de covid-19, debido a la propagación de noticias falsas sobre curas “milagrosas” o sobre el uso de las vacunas.

Esto se hace imprescindible en un contexto como el de México debido a que la búsqueda de información es uno de los principales usos que se da al internet, tal como lo señala la Encuesta Nacional sobre Uso y Disponibilidad de la Información en los hogares (ENDUTIH, 2024) la cual señala que el 88.2 % de los usuarios de internet en México concentran su uso en efectuar búsquedas de información.

¿Qué habilidades son las necesarias para la curaduría de contenidos?

Probablemente, existen un sinnúmero de habilidades necesarias para ser un buen curador de contenidos. La primera habilidad necesaria sería el poder administrar la información que se obtiene de manera digital; además, debe poseer ciertas habilidades para discernir información que sea importante de aquella que no lo es. Además, a partir de ese discernimiento, debe poder seleccionar la información.

Para Barghava, en el año 2009, experto en contenido digital, el curador de contenidos requiere diferentes habilidades que le permiten encontrar, clasificar, organizar y compartir contenido relevante. Estas habilidades de comunicación y gestión pueden ser desarrolladas por todas aquellas personas interesadas en compartir información y gestionarla y son utilizadas en ámbitos como grandes empresas, marketing y docencia.



Figura 2. Curación de contenidos

Esta foto de autor desconocido está bajo licencia CC BY-NC-ND <https://rincondelbibliotecario.blogspot.com/2016/07/que-es-curacion-de-contenidos-y-para.html>

Ventajas de la curaduría de contenidos

Son diferentes los beneficios que se pueden atribuir a la CC, considerando así que uno de los mayores consiste en la discriminación de información verdadera de la que no lo es, lo cual trae consecuencias en diferentes ámbitos, debido a que compartir información falsa puede, como ya se mencionó en un ejemplo dado anteriormente, ocasionar diferentes problemáticas dependiendo del ámbito en el que dicha información sea expuesta.

Para Good como experto en curación de contenidos existen muchos beneficios al curar contenidos, uno de los más importantes es el ahorro de tiempo, debido a que la información sería más concreta y acorde a la búsqueda requerida (figura 3).



Figura 3. La curación de contenidos permite el filtro de información adecuada. Imagen creada por Gemini pro y chat GPT.

¿Cuáles son algunos de los modelos de curaduría de contenidos existen?

Las diferentes necesidades en los entornos digitales justifican los diferentes modelos existentes de CC. Esto quiere decir que, existen diferentes modelos de curación de contenidos que puede ser utilizada en distintos contextos (figura 4), entre los que se destacan, el de Higgins, el de Guallar y Leiva (4S's); el modelo CAS; cada uno de ellos serán explicados de manera breve a continuación.

El modelo de Higgins creado en el año 2008 señala que la curación de contenidos es un proceso que se establece desde diferentes etapas, entre las que se pueden mencionar la recepción y creación, valoración y selección, conservación, preservación, uso y reúso de la información; cada una de estas etapas permite seleccionar el tema que se va a investigar, buscar las fuentes en las que se consultará y hacer accesible la información.

Por otra parte, se tiene el modelo de CAS (Curation Analysis System) de Guallar, Pedraza-Jiménez y Pérez Montoro en el año 2022. Dicho modelo señala que, entre más son las fuentes de información, mejor será la curaduría, evaluando en cuánto tiempo ha ocurrido el proceso curatorial. Cabe destacar que este método asigna cierto valor a algunos de los parámetros que ya se han encontrado expuestos; este se encuentra en proceso de mejora. Hasta ahora solo se ha buscado aplicar este modelo en periódicos.

A los anteriores se suma el modelo de Guallar y Leiva (4S's) propuesto en el año 2013, divide el proceso de curaduría de contenidos en 4 etapas: búsqueda, selección, caracterización y compartir la información. A estas se añadió la etapa de evaluar la información que se cura.



Figura 4. Distintos contextos de utilización de la CC. Creación propia



Figura 5. Modelo de las 4S's. Tomado de Guallar J. (2022) <http://www.loscontentcurators.com>

El modelo de “Guallar y Leiva” permite buscar y seleccionar la información que se va a curar; la etapa seguida a esa es la de caracterización. A esta se agrega la modificación de información seleccionada a partir de la adhesión de contenido proveniente del curador. Es decir, el contenido se transforma al anexas información a lo ya establecido, como puntos de vista y otros, pero buscando que esta información que se agregue aporte valor para el contenido curado.

Otras formas de curaduría de contenidos

Otra forma de curar contenidos son las utilizadas a través de otros medios o plataformas digitales; un ejemplo de ello lo realizaron Negre, Marín y Pérez, quienes utilizaron la plataforma de Mendeley; algunos otros utilizaron otras plataformas como scoop.it.

Es por ello, que es de gran importancia que al hablar de CC, se pueda hablar de que está se

Existen algunos otros modelos de curación de contenidos, algunos de ellos como el de Negre, Marín y Pérez diseñado en 2013, otros creados en el mismo año como el de Wolff y Mulholland y el de Deschaine y Sharma en el 2015.

En algunas investigaciones también se señala el uso de modelos de curación de contenidos ya existentes adaptándolos a diferentes contextos, como los ya mencionados en la figura 1; concibiendo así que la curaduría de contenidos es una herramienta que aún se encuentra en construcción y transformación.

puede realizar mediante el uso de diferentes herramientas, como plataformas digitales, las cuales son de gran ayuda para la curaduría de contenidos, además de a través de ellas se pueden obtener diferentes beneficios como el poder compartir la información en redes sociales, a esto se suma el que permite la visualización de contenido importante y compartirla a más personas, con diversos propósitos (figura 6)

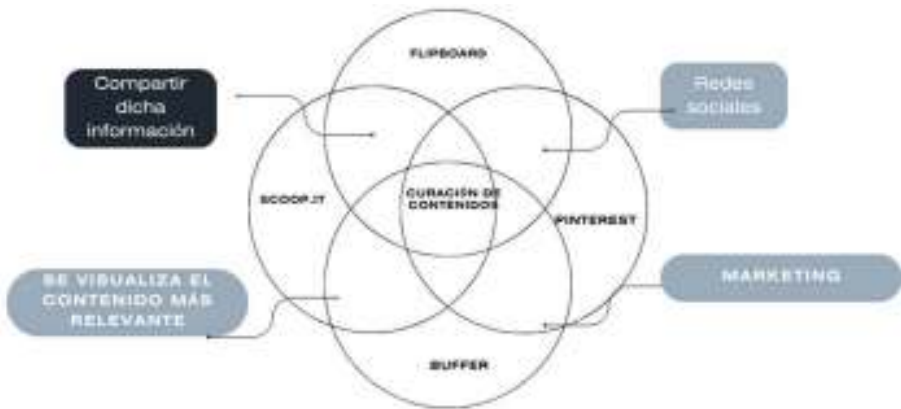


Figura 6. Elaboración propia. Plataformas y/o páginas que contribuyen a la curación de contenido. Elaboración propia.

Las anteriores son un ejemplo de páginas y/o plataformas que curan contenidos, todas muy sencillas de utilizar y con el único objetivo de ayudarnos a filtrar aquella información que sea más relevante para nuestra curación.

Cabe resaltar que, además de las anteriores, actualmente existen otras que hacen referencia a la Inteligencia Artificial (figura 7), cabe resaltar que, su uso no significa que no se requiere del curador, debido a que el curador sigue siendo el que orienta la actividad curadora.

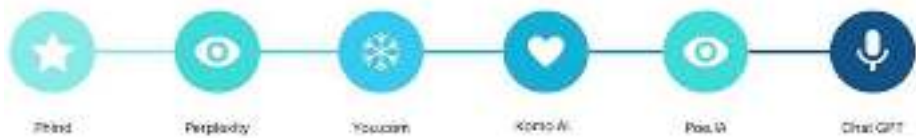


Figura 6. Elaboración propia. Plataformas y/o páginas que contribuyen a la curación de contenido. Elaboración propia.

Conclusiones

Cabe resaltar que la curaduría de contenidos, si bien es una herramienta que surge aproximadamente a inicios de este siglo de manera digital, su importancia ha visto la luz desde épocas anteriores. De manera analógica, se encontraba en las aulas escolares con el uso de las antologías creadas por los docentes. Estas concentraban información seleccionada por ellos, permitiendo que todo el material requerido para la clase y los temas a analizar se ubicara en un solo lugar.

Así, la curaduría de contenidos ha ido evolucionando hasta convertirse en lo que ahora se ha presentado ante nosotros como una herramienta que permite que podamos corroborar que aquello que encontramos de manera digital sea verdadero y, sobre todo, sea útil a nuestra búsqueda.

A lo anterior se suma, que hoy en día, aquel que hace curación de contenidos debe poseer como habilidad obligatoria e imprescindible, una genuina preocupación e interés por la forma en la que la información es compartida y sumado a ello debe poseer un pensamiento crítico voraz

que lo aliente a reflexionar y cuestionar la información que encuentre.

En conclusión, la CC es una actividad esencial que debe realizarse al buscar información en medios digitales. Es necesario que aquellos que comparten o acceden a estos contenidos verifiquen la veracidad de los mismos, debido a que de lo contrario, esto puede repercutir en la sociedad. Es ahí donde radica el papel imprescindible de la CC, la cual permite que haya honestidad en el contenido compartido en internet.

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.

Conflicto de intereses

Los autores del presente artículo declaran que no existe ningún conflicto de intereses que pueda influir en el contenido del presente artículo.

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

Especiales agradecimientos a quienes contribuyeron a la realización y corrección del presente escrito, a *SECIHTI*, cuya contribución ha sido primordial para el mismo.

Referencias

- Alcoverro, H., & Cyberclick. (s. f.). Curación de contenidos: Qué es y las 30 mejores herramientas. Recuperado 18 de septiembre de 2023, de <https://www.cyberclick.es/numerical-blog/curacion-de-contenidos-que-es-y-las-mejores-herramient>
- Arroyo-Vázquez, N. (2014). El content curator. Guía básica para el nuevo profesional de internet. Javier Guallar, Javier Leiva-Aguilera. Barcelona: Editorial UOC, 2013. (El profesional de la información: 24). ISBN 978-84-9064-018-0. Revista Española de Documentación Científica, 37(2), Article 2.
- Buffer: All-you-need social media toolkit for small businesses. (s. f.). Buffer: All-you-need social media toolkit for small businesses. Recuperado 18 de septiembre de 2023, de <https://buffer.com/>
- Cornella (2013). Infoxicación. Alfons Cornella Semper Progredi (en línea) <https://alfonscornella.com/2013/10/02/infoxicacion>.
- Curation Analysis System (CAS): A method for analysing digital media content curation. (2022). En Visualisations and narratives in digital media. Methods and current trends. DigiDoc Research Group & Ediciones Profesionales de la Información SL. <https://doi.org/10.3145/indocs.2022.3>.
- Deschaine, M., & Sharma, S. A. (2015). The Five Cs of Digital Curation: Supporting Twenty-First-Century Teaching and Learning. InSight: A Journal of Scholarly Teaching, 10, 19-24. <https://doi.org/10.46504/10201501d>
- Godoy-Rodríguez, Carlos(2018). La curación de contenidos digitales. Competencia indispensable para los docentes del siglo XXI. URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/390/3902684004>
- Good R. (2017). Curación de Contenidos en la era digital. Curación para el patrimonio digital. Cultura Inteligente. Análisis de tendencias digitales.6-27. Recuperado de: <https://www.accioncultural.es/media/Default%20files/activ/2017/ebook/anuario/1CuracionContenidos.RobinGood.pdf>
- Hernández Campillo, T. R., Carvajal Hernández, B. M., Legaño Ferrá, M. de los Á., Campillo Torres, I., Hernández Campillo, T. R., Carvajal Hernández, B. M., Legaño Ferrá, M. de los Á., & Campillo Torres, I. (2021). Retos y perspectivas de la curación de contenidos digitales en la formación continua de profesores universitarios. Perspectiva Educacional, 60(1), 23-57. <https://doi.org/10.4151/07189729-vol.60-iss.1-art.1091>
- Juárez Popoca, D., Torres Gastelú, C. A., Herrera Díaz L.E., (2017). Las posibilidades educativas de la curación de contenidos: una revisión de literatura. Volumen 9, número 2, pp. 116-131. doi: <http://dx.doi.org/10.32870/Ap.v9n2.1046>
- Jarcho Harol (2011). Dominio del conocimiento de la información. Tomado de: <https://jarcho.com/pkm/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2019). Comunicado de Prensa (252/19) Estadística a propósitos6 del día mundial del internet. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2019/internet2019.Nal.pdf>
- Manifiesto For The Content Curator: The Next Big Social Media Job Of The Future ? - Rohit Bhargava. (2009, septiembre 30). <https://rohitbhargava.com/manifiesto-for-the-content-curator-the-next-big-social-media-job-of-the-future/>
- Negre Bannasar, F., Marín Juarros, V. I., & Pérez Garcías, A. (2013). Estrategias para la adquisición de la competencia informacional en la formación inicial de profesorado de primaria. Revista Electrónica Interuniversitaria de Formación del Profesorado, 16(2), 1-12) <https://doi.org/10.6018/reifop.16.2.180751>
- Portada. (s. f.). Pocket. Recuperado 18 de septiembre de 2023, de <https://getpocket.com/es/>
- Scoop.it—Content Curation Tool | Scoop.it. (s. f.). Recuperado 18 de septiembre de 2023, de <https://www.scoop.it/>

Recepción: 25.10.2025

Revisión: 30.12.2025

Publicación: 15.01.2026

<https://orcid.org/0009-0004-9045-7916>

<https://orcid.org/0000-0003-3509-1777>

ALIMENTAR EL FUTURO DE LA HUMANIDAD ¿ES LA HIDROPONÍA REALMENTE UNA SOLUCIÓN MÁS SOSTENIBLE?

FEEDING THE FUTURE OF HUMANITY IS HYDROPONICS
REALLY A MORE SUSTAINABLE SOLUTION?

Alejandro Alcázar Aguilar¹
Beatriz Espinosa Aquino²

¹Lic. en energías renovables. Facultad de Electrónica
Av. San Claudio y 18 Sur Edif. FCE1. Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria, Puebla, Pue., C.P. 72570.

²Centro de Química, Instituto de Ciencias
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Correos:
alejandro.alcazar@alumno.buap.mx
beatriz.espinosa@correo.buap.mx

Resumen

El desafío de alimentar a una población en crecimiento de manera sostenible es uno de los desafíos que los países enfrentan actualmente. La agricultura convencional resulta insostenible debido a prácticas generalizadas que provocan la degradación del suelo y contaminación de mantos acuíferos por el uso intensivo de agroquímicos como fertilizantes e insecticidas. Además, representa el mayor consumidor de agua dulce a nivel mundial y un contribuyente significativo al cambio climático, debido en gran medida a su demanda incesante de suelo fértil, que lleva a la deforestación. La hidroponía se posiciona como una alternativa prometedora, capaz de producir más alimentos con hasta un 90% menos de agua y sin necesidad de tierra fértil. Este artículo examina si esta tecnología ofrece un camino más sostenible, sopesando su potencial de ahorro drástico de agua y altos rendimientos frente a sus altas demandas energéticas, particularmente en granjas verticales de ambiente controlado. Explora cómo los sistemas simplificados adaptados a climas locales, la integración con energías renovables, los enfoques de economía circular y las aplicaciones en agricultura urbana pueden mitigar esta huella energética. La conclusión es que la sostenibilidad de la hidroponía no es inherente, sino contextual; su futuro papel depende de un diseño inteligente que priorice la eficiencia energética, el empoderamiento comunitario y la sinergia ecológica, convirtiéndola en una herramienta versátil dentro de una transición más amplia hacia sistemas alimentarios resilientes.

Palabras clave: hidroponía, desarrollo sostenible, sistemas alimentarios alternativos, granja vertical, economía circular.

Abstract

The challenge of feeding a growing population sustainably is one of the problems that countries face on a daily basis. Conventional agriculture, in its current form, is unsustainable due to practices that lead to soil degradation and widespread water contamination from agrochemicals like fertilizers and insecticides. Furthermore, it is the largest consumer of freshwater resources and a significant contributor to climate change, largely due to its incessant demand for fertile soil, which drives massive deforestation. Hydroponics emerges as a promising alternative for sustainable food production, yielding more food with up to 90% less water and no requirement for arable land. This article examines whether soilless cultivation offers a more sustainable path, weighing its potential for drastic water savings and high yields against its significant energy demands, particularly in controlled-environment vertical farms. It explores how simplified systems adapted to local climates, integration with renewable energy, circular-economy approaches, and applications in urban agriculture can mitigate this energy footprint. The conclusion is that hydroponics' sustainability is not inherent but contextual; its future role hinges on intelligent design that prioritizes energy efficiency, community empowerment, and ecological synergy, making it a versatile tool within a broader transition toward resilient food systems.

Keywords: hydroponics, sustainable development, alternative food systems, vertical farming, circular economy.

Introducción

Todos amamos la comida, todos necesitamos de ella. Aunque pocos, realmente somos conscientes de la cantidad de recursos, trabajo humano y energía que fueron necesarios para producirla y llevarla a nuestra mesa.

Te has preguntado: ¿de dónde vienen los alimentos? ¿Cómo se cultivan? ¿Cuánto tardan en crecer?. Usualmente, vemos los alimentos en los supermercados, en el mercadillo, en la tienda y los colocamos en el refrigerador.

Las formas de producción de alimentos en el planeta son diversas, según el país, el pueblo, la ciudad e incluso en cada casa, la elaboración de alimentos es diversa, así como los ingredientes. Ante este panorama los cultivos de alimentos y la necesidad de consumo son diversos, para ello se necesitan miles de hectáreas para satisfacer la demanda, los insumos necesarios, agroquímicos, mejoradores de suelo, fertilizantes, insecticidas, pesticidas, acaricidas, etc., para asegurar que los cultivos crezcan y lleguen a tu mesa, todas estas acciones desgastan a los suelos, afectan a los ecosistemas y consumen agua.

La sostenibilidad de la hidroponía no es inherente, sino contextual; su papel futuro depende de un diseño inteligente que priorice la eficiencia energética, el empoderamiento de la comunidad y la sinergia ecológica, lo que la convierte en una herramienta versátil. La sostenibilidad es la capacidad de satisfacer nuestras necesidades diarias sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer las suyas (ONU, 1987).

En la actualidad, la producción global de alimentos representa alrededor del 30% del consumo de energía mundial y cerca del 20% de las **emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)** (FAO, 2011). Y mientras más pasa el tiempo, la relación entre alimentar a la humanidad y proteger el medioambiente se vuelve más compleja (Juo & Freed, 1995).

Para 2050, necesitaremos alimentar a casi 10.000 millones de personas (ONU, 2017). Tan

solo en América Latina, la demanda de alimentos crecerá un 31% mientras que la demanda de agua llegará hasta el 75% (Mahlknecht et al., 2020; Miralles-Wilhelm & Muñoz-Castillo, 2018). Mientras tanto, la agricultura convencional, el medio más extendido para producir nuestros alimentos actualmente, ve cómo sus recursos—suelo fértil y agua limpia—se agotan a un ritmo alarmante debido a su sobreexplotación, la degradación ambiental y las consecuencias del cambio climático.

La agricultura convencional se vuelve insostenible

La **agricultura convencional**, esa que nos trae a la mente de enormes campos de cultivo bajo el sol, es uno de los principales contribuyentes de esta crisis (Fitton et al., 2019; IPCC, 2019). De la superficie total del planeta que los humanos hemos ocupado, el 38% lo dedicamos exclusivamente para el cultivo de los alimentos (Boylan, 2020; Pomoni et al., 2023). Esta cifra sigue creciendo, pues cada año se talan miles de hectáreas de selva, especialmente en regiones como el Amazonas, en busca de más tierra fértil para aumentar la producción agrícola y ganadera (Haddad et al., 2024). Mientras tanto, el 70% del agua dulce de la que disponemos se usa para regar estos campos (Fitton et al., 2019; Pomoni et al., 2023).

Resulta, pues, bastante claro que la agricultura representa un problema grave de sostenibilidad. Al tiempo que la población crece, crece junto con ella la demanda de alimentos, lo que nos lleva a expandir nuestros terrenos de cultivo e incrementar con ello la demanda del consumo de agua, degradando el ambiente en el proceso y agravando la crisis. Todo se convierte así en un círculo vicioso del que se ve muy difícil escapar.

En este contexto surge la urgencia por buscar alternativas sostenibles para la producción de alimentos y es justo allí, que la alternativa sostenible que puede ser adoptada en espacios pequeños en ciudades o en grandes extensiones denominadas granjas de hidroponía.

La hidroponía ¿nuestra salvación?

Antes hablamos sobre cómo los principales recursos necesarios para producir nuestra comida son la tierra fértil y el agua dulce, y cómo estos comienzan a escasear o degradarse a un ritmo alarmante, pero ¿y si te dijera que existe una forma de cultivar alimentos sin tierra? Un método que utiliza hasta **90% menos agua**, multiplica por diez la producción y puede ser implementado hasta en los terrenos más inhóspitos, desde un almacén en el centro de la ciudad, hasta el ártico, el desierto, ¡O el mismo espacio exterior!

Las plantas como las conocemos crecen en la tierra, de la cual extraen los nutrientes que necesitan (principalmente) y luego los procesan utilizando la energía del sol (Curtis y Barnes, 1989; Salomón et al., 1996). La **hidroponía** es una técnica de cultivo sin tierra en el cual a las plantas son alimentadas exclusivamente a través de agua enriquecida con nutrientes (Resh, 1997), a diferencia de la agricultura convencional, donde

al regar el agua se filtra al subsuelo, siendo está imposible de recuperar (lo cual explica su altísima demanda de agua) en la hidroponía esta agua se mantiene o se recircula dentro de un sistema cerrado, haciendo que las pérdidas sean mínimas, apenas representadas por el agua que absorbe la planta y la evaporación de la misma en el ambiente (Naresh et al., 2024).

Esta técnica es la base de la **Agricultura vertical**: los cultivos hidropónicos en forma de torres, o galeras apiladas una sobre otra para aprovechar al máximo el espacio vertical, donde antes crecían dos plantas, ahora pueden crecer veinte de tal forma que se aprovecha al máximo el espacio disponible, utilizando torres o apilando líneas de canales hidropónicos uno encima de otro dentro de grandes invernaderos en ambiente altamente controlado. En ese metro cuadrado donde antes crecían un par de plantas de acelga, ahora pueden crecer 10 o 20, o cuantas quieras en tanto alto quieras ir.



Figura 1. Cultivo hidropónico. [https://r.search.yahoo.com/_ylt=AwrjZhSuw3tpk2AGfDHO8Qt.;ylu=c2VjA2ZwLWF0dHJpYgRzbGsDcnVyba-/RV=2/RE=1769747502/RO=11/RU=https%3a%2f%2fhidroponia.](https://r.search.yahoo.com/_ylt=AwrjZhSuw3tpk2AGfDHO8Qt.;ylu=c2VjA2ZwLWF0dHJpYgRzbGsDcnVyba-/RV=2/RE=1769747502/RO=11/RU=https%3a%2f%2fhidroponia.mx%2fguia-completa-para-empezar-un-cultivo-de-hidroponia-en-casa%2f/RK=2/RS=A_XUaf8nzYyblL_Z4fTtOUpr.QA-)

[mx%2fguia-completa-para-empezar-un-cultivo-de-hidroponia-en-casa%2f/RK=2/RS=A_XUaf8nzYyblL_Z4fTtOUpr.QA-](https://r.search.yahoo.com/_ylt=AwrjZhSuw3tpk2AGfDHO8Qt.;ylu=c2VjA2ZwLWF0dHJpYgRzbGsDcnVyba-/RV=2/RE=1769747502/RO=11/RU=https%3a%2f%2fhidroponia.mx%2fguia-completa-para-empezar-un-cultivo-de-hidroponia-en-casa%2f/RK=2/RS=A_XUaf8nzYyblL_Z4fTtOUpr.QA-)



Figura 2. Torres hidropónicas. https://r.search.yahoo.com/_ylt=AwrOo13FyXtpVAoQX.z08Qt.;yлу=c2VjA2ZwLWF0dH-JpYgRzbGsDcnVyBA--/RV=2/RE=1769749061/RO=11/RU=https%3a%2f%2fwww.arkiplus.com%2fhidroponia-vertical/RK=2/RS=Cbehf7K62ieCcpMXrjDa34LAsU-

Según un estudio comparativo sobre la producción de lechugas en Arizona, EE. UU. El cultivo mediante hidroponía ofrece una producción **11 veces mayor** al del cultivo tradicional en suelo, así como un consumo de agua **13 veces menor** (Barbosa et al., 2015). Por su parte, Nederhoff

& Stanghellini (2010) demostraron que el agua requerida para producir 1 kg de tomates frescos puede reducirse de **300L** a tan solo **4L** en granjas hidropónicas de ambiente controlado en sistema cerrado del invernadero les permite recuperar entre el 40-75% del agua que se evapora.

Todo esto suena excepcional, entonces ¿Cuál es la letra pequeña? En una sola palabra: Energía.

El estudio de Barbosa et al. (2015) mostró que, si bien el ahorro de agua era enorme, cada kilogramo de lechuga hidropónica consumía **82 veces más energía** que la cultivada de forma tradicional. ¿La razón? Estas granjas de agricultura vertical estudiadas son, en realidad, **fábricas de plantas**. Para lograr esa productividad extraordinaria, necesitan un ambiente perfecto creado artificialmente: luces que sustituyen al sol, sistemas de climatización que mantienen una temperatura ideal y bombas que circulan el agua sin parar. Este es el precio de la máxima eficiencia en espacio y agua.

Este alto consumo energético se traduce, a su vez, en emisiones de gases de efecto invernadero. Según Vatisistas et al. (2022), producir

un kilogramo de alimento en estos sistemas puede generar hasta **5.7 kg de CO₂**, esto es más de **diez veces** las emisiones de la agricultura convencional (0.54 kg de CO₂).

Son varios los estudios que confirman la misma historia, independientemente del tipo de cultivo: al tratarse de agricultura vertical, la mayor parte del gasto energético proviene de la iluminación y del clima artificial presente en estas granjas (Martin & Molin, 2019).

Por todas estas razones, tal como señalan los mismos Barbosa et al. (2015) en sus conclusiones: en este momento la hidroponía aún no puede ser considerada como una solución más sostenible.

Entonces, ¿cuál es la alternativa?

Muchos estudios se han realizado para medir el consumo energético de los cultivos hidropónicos bajo diversas condiciones; uno de los más interesantes fue el estudio realizado por Martínez-Mate et al. (2018) donde se estudiaron las emisiones de **GEI** de un huerto hidropónico de tomates en el sur de España.

La energía específica para producir un kg de tomates en un sistema hidropónico era apenas un 17 % mayor. Algo bastante más modesto que el 1100% adicional de las lechugas en Arizona. ¿Cómo es esto posible? ¿Es que los tomates no requieren tanta energía como las lechugas? En realidad, la respuesta está en el sistema empleado: mientras que la producción de lechugas en Arizona se lleva a cabo en ambientes altamente controlados en temperatura, iluminación, humedad, etc. El clima mediterráneo del sur de España permite que los tomates pudieran ser cultivados al exterior, sin necesidad de sistemas que permitieran regular el clima o la iluminación, en este caso específico, la energía extra requerida se debió casi exclusivamente al sistema de bombeo y circulación del agua.

La clave de la ruta de acción para reducir el impacto ambiental de los sistemas hidropónicos y para que estos sean más sostenibles es simplificarlos y adecuarlos a las condiciones climáticas de cada lugar. Aprovechar los climas favorables a cada tipo de cultivo para prescindir de los ambientes controlados: si puedes cultivar afuera, ¿para qué necesitar un invernadero con clima controlado?

Así han surgido propuestas interesantes para difundir y promover el uso de estos sistemas en zonas con climas favorables. Una de estas propuestas es la conocida como “Huerta Hidropónica Popular” promovida por la FAO (Izquierdo & Marulanda, 2003). La cual consiste en, como ya se dijo antes, simplificar estos sistemas de modo que puedan ser montados y administrados por las mismas comunidades, cultivando alimentos adecuados a su entorno y teniendo un consumo mínimo de energía.

Otra de las propuestas, manteniéndose del lado de la producción intensiva, es integrar el uso de energías renovables como fuente primaria para el funcionamiento de estas granjas verticales intensivas, es decir: se sigue utilizando mucha más energía para eficientar la producción al máximo, pero esta energía proviene de fuentes limpias que hacen que se reduzca por mucho su impacto ambiental.

Los estudios de Liantas et al. (2023) compararon el impacto ambiental (huella de carbono) de una granja hidropónica que utilizó la red eléctrica convencional y de una que utilizó un sistema de energía solar para alimentarla, respectivamente. Liantas concluyó que, al usar un sistema de energía solar, se emiten unas 30 veces menos CO₂ al año.

Por otra parte, Jassim et al. (2024) analizaron el desempeño de un prototipo que integra una torre de cultivo hidropónico dentro de una cámara de ambiente controlado, un sistema de energía solar, bombeo y una unidad de control y monitoreo. Este análisis demostró que el sistema de energía solar genera suficiente energía para mantener el sistema funcionando de manera autónoma.

Otros estudios, como el de Martin & Molin (2019), exploran otro concepto interesante: la simbiosis y el aprovechamiento de la energía residual urbana. Dentro de su estudio se llegó a la misma conclusión: la mayor parte del impacto ambiental viene de la mano con los sistemas de iluminación y climatización (especialmente en un lugar tan frío como puede llegar a ser Suecia, donde toma lugar el estudio); sin embargo, este sistema no toda la energía utilizada proviene de la red eléctrica: una parte importante se aprovecha de la energía térmica (calor) residual del edificio sobre el cual se encuentra montado el sistema, creando una sinergia relevante que sienta las bases para desarrollar esta clase de relaciones simbióticas de maneras muy creativas.

Finalmente, Abdelhamid et al. (2025) realizaron un análisis comparativo del desempeño, la

eficiencia energética y el impacto ambiental de sistemas hidropónicos que utilizan energía solar frente a aquellos que utilizan la red eléctrica convencional. Demostraron que el sistema alimentado por energía solar obtuvo un aprovechamiento energético superior al de su contraparte. Esto redujo drásticamente sus emisiones de carbono.

Estos estudios demuestran que la integración de energías renovables con tecnologías hidropónicas no solo es posible, sino factible, aquí el único detalle que falta por tratar es la viabilidad

económica de realizar esta integración pues, montar un sistema de energía solar fotovoltaica no es precisamente barato y, aunque con el paso del tiempo la inversión puede verse recuperada e incluso representar ganancias, la inversión inicial no deja de ser fuerte y algo que no todos los productores se pueden permitir.

Finalmente, algunos autores proponen un enfoque más holístico. Esto quiere decir: ver algo como un todo. Por ejemplo, Chatterjee et al. (2025) sugieren la integración de la hidroponía en sistemas como el siguiente:

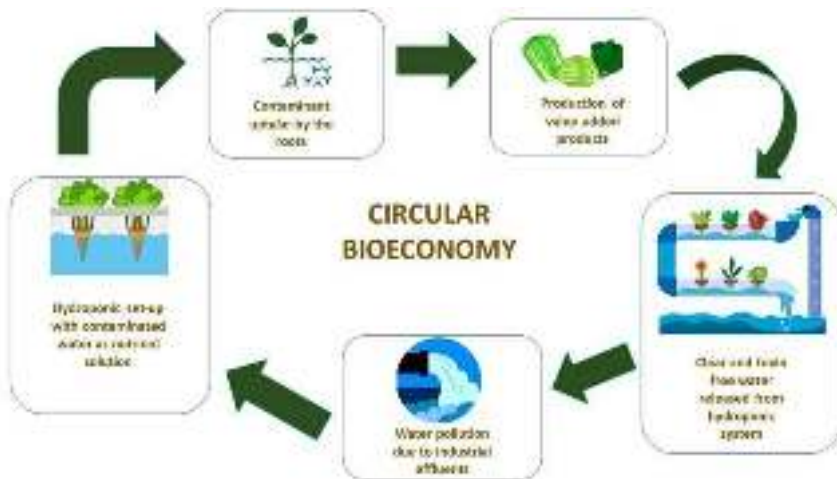


Figura 3. Diagrama que presenta la propuesta de un sistema hidropónico adaptado a los conceptos de la bioeconomía y de la economía circular. Fuente: Chatterjee et al. (2025)

Como podemos observar, este sistema plantea un ciclo en el que las plantas a cultivar se utilizan como biorremediadores, es decir, actúan como filtros naturales vivos. Se ‘alimentan’ de los contaminantes presentes en el agua, que para ellas son nutrientes, y limpiándolo en el proceso mientras crecen. Esto tiene un doble beneficio: descontaminar el agua sin necesidad de un uso intensivo de energía, a la vez que se producen vegetales frescos para consumo. Esto es posible, en el ambiente o la vida acuática, por considerar algunos contaminantes y toxinas, para muchas especies de plantas serán nutrientes que les permiten desarrollarse. Entonces,

el sistema se alimenta de agua “contaminada”, las plantas se nutren y absorben esos contaminantes y finalmente el agua sale del sistema libre de toxinas.

Enfoques como estos avanzan la idea de una economía circular, es decir, una economía sin desechos, esto es posible gracias a que comienzan a verse los residuos de un proceso como la materia prima de otro, en el caso anterior: las aguas contaminadas con ciertos elementos debido a la actividad humana e industrial se utilizan como fuente de nutrientes para la producción de alimentos.

El futuro de la hidroponía

El futuro inmediato de la hidroponía parece dirigirse por tres caminos paralelos en su búsqueda por la sostenibilidad:

1. **Sistemas simplificados** para la agricultura urbana y comunitaria, que aprovechen los climas favorables para minimizar el consumo energético.
2. **Integración de energías renovables en los sistemas intensivos**, mediante el uso de paneles solares u otras fuentes de energía alternativas, que compensen el alto consumo eléctrico.
3. **Incorporación de modelos de economía circular**, en los que la hidroponía no solo produce alimentos, sino que también contribuye a resolver otros problemas ambientales, como la descontaminación de aguas.

Sin embargo, hay un aspecto que no hemos explorado del todo y no podemos dejar pasar por alto: su papel dentro de la **agricultura urbana** y el fortalecimiento de la soberanía alimentaria de las comunidades:

La hidroponía ofrece un panorama prometedor para la agricultura urbana, ya que propone traer la producción de alimentos del campo a la ciudad; se presenta como una respuesta viable para mitigar problemas generados por la rápida urbanización, como la escasez de alimentos y de tierra (Chatterjee et al., 2025).

Autores como Chatterjee et al. Están convencidos de que la hidroponía puede reforzar la bioeconomía y el crecimiento agrícola sostenible.

Al realizar estudios de **Análisis de ciclo de vida (LCA)**, muchos estudios reportan que la producción local de alimentos puede resultar mucho más eficiente en términos energéticos, esto debido a los grandes ahorros que representa en transporte (Edwards-Jones et al., 2008).

Un estudio realizado en Filipinas muestra que los huertos hidropónicos en las azoteas del Metro Manila podrán reducir las emisiones anuales de CO₂ en 1.962,67 toneladas al eliminar la necesidad de importación de lechuga, así como ahorrar energía al utilizar fuentes de energía renovable para el funcionamiento de las bombas y aireadores requeridos por los sistemas hidropónicos (Taylor et al., 2012).

Casos reportados como los de Turner et al. (2024) en Hanoi, Vietnam. Muestran cómo la agricultura urbana desarrollada a través de huertos urbanos en las azoteas de la ciudad se ha convertido en una manera eficaz de mitigar estos problemas, empoderando además a la comunidad, volviéndose más resilientes y menos dependientes de las largas cadenas de suministro. Ghimire et al. (2024) respalda este punto al mostrar que la agricultura urbana, especialmente el cultivo de hortalizas, puede mejorar la calidad de la alimentación y nutrición de las comunidades urbanas marginadas, además de fortalecer el tejido social de la comunidad.

Conclusión

En definitiva, la hidroponía por sí sola no es la solución definitiva a nuestros problemas, pero sí una herramienta poderosa y versátil dentro del arsenal necesario para alimentar al futuro. Su verdadero potencial de sostenibilidad no está en la tecnología por sí misma, sino en cómo la implementamos. Al diseñar sistemas simplificados que aprovechen climas favorables, integrarlos con energías renovables, concebirlos bajo principios de economía circular y, sobre todo, al ponerlos al servicio de la soberanía alimentaria de la comunidad, la hidroponía puede trascender su actual dilema energético. Así, deja de ser una simple alternativa para convertirse en un componente clave de un sistema alimentario más resiliente, descentralizado y en armonía con los límites del planeta. Todo depende de nuestra capacidad para adaptar esta tecnología con inteligencia, contexto y una visión integral que priorice tanto al planeta como a las personas.

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 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 a la Revista Digital Internacional de Divulgación Científica del Instituto de Ciencias por dar a conocer las diversas temáticas que deben ser conocidas por los lectores.

Referencias

- Abdelhamid, M. A., Mahmoud, S. M., El-Nasr, M. K. A., Zhang, Z., & Hendy, Z. M. (2025). Sustainable hydroponic production using solar energy and treated greywater within the water-energy-food-environment nexus. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-16030-4>
- Barbosa, G. L., Almeida Gadelha, F. D., Kublik, N., Proctor, A., Reichelm, L., Weissinger, E., Wohlleb, G. M., & Halden, R. U. (2015). Comparison of land, water, and energy requirements of lettuce grown using hydroponic vs. Conventional agricultural methods. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(6), 6879–6891. <https://doi.org/10.3390/ijerph120606879>
- Boylan, C. (2020, November 9). The Future of Farming: Hydroponics. <https://Psci.Princeton.Edu/Tips/2020/11/9/the-Future-of-Farming-Hydroponics>.
- Chatterjee, A., Ghosh, P., Winkler, B., V. V., Debnath, S., Cichocki, J., Trenkner, M., Vanicela, B., Riethmueller, C., Walz, M., Chandra, S., & Pal, H. (2025). Demystifying the integration of hydroponics cultivation system reinforcing bioeconomy and sustainable agricultural growth. *Scientia Horticulturae*, 341. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2025.113973>
- Curtis, H., & Barnes, N. S. (1989). Photosynthesis, Light, and Life. In *Biology* (Fifth Edition, pp. 206–231). Worth Publishers, Inc.
- Edwards-Jones, G., Milà i Canals, L., Hounsoms, N., Truninger, M., Koerber, G., Hounsoms, B., Cross, P., York, E. H., Hospido, A., Plassmann, K., Harris, I. M., Edwards, R. T., Day, G. A. S., Tomos, A. D., Cowell, S. J., & Jones, D. L. (2008). Testing the assertion that "local food is best": the challenges of an evidence-based approach. *Trends in Food Science and Technology*, 19(5), 265–274. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.01.008>
- FAO, "Energy-Smart" Food for People and Climate, Rome, Italy, 2011. [Online]. Available: <https://www.fao.org/3/i2454e/i2454e00.pdf>
- Fitton, N., Alexander, P., Arnell, N., Bajzelj, B., Calvin, K., Doelman, J., Gerber, J. S., Havlik, P., Hasegawa, T., Herrero, M., Krisztin, T., van Meijl, H., Powell, T., Sands, R., Stehfest, E., West, P. C., & Smith, P. (2019). The vulnerabilities of agricultural land and food production to future water scarcity. *Global Environmental Change*, 58. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.101944>
- Ghimire, A., Ojha, S., Saud, S., Aryal, S., Thapa, A., & Bhandari, P. (2024). THE IMPERATIVE ROLE OF URBAN HORTICULTURE IN FUTURE SUSTAINABILITY: A REVIEW. *Review. i TECH MAG*, 6, 48–56. <https://doi.org/10.26480/itechmag.06.2024.48.56>
- Haddad, E. A., Araújo, I. F., Feltran-Barbieri, R., Perobelli, F. S., Rocha, A., Sass, K. S., & Nobre, C. A. (2024). Economic drivers of deforestation in the Brazilian Legal Amazon. *Nature Sustainability*, 7(9), 1141–1148. <https://doi.org/10.1038/s41893-024-01387-7>
- Izquierdo, J., & Marulanda, C. (2003). La Huerta Hidropónica Popular- Curso Audiovisual. <https://www.researchgate.net/publication/347513935>
- Jassim, E., Jasem, B., & Djavanroodi, F. (2024). Assessment of utilizing solar energy to enhance the performance of vertical aeroponic farm. *Materials Research Proceedings*, 43, 118–123. <https://doi.org/10.21741/9781644903216-16>
- Juo, A. S. R. ., & Freed, R. D. . (1995). Agriculture and environment: Bridging Food Production and Environmental Protection in Developing Countries. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America.
- Land is a Critical Resource, IPCC report says. (2019, August 8). <https://www.ipcc.ch/2019/08/08/Land-Is-a-Critical-Resource-srcl/>.
- Liantas, G., Chatzigeorgiou, I., Ravani, M., Koukounaras, A., & Ntinias, G. K. (2023). Energy Use Efficiency and Carbon Footprint of Greenhouse Hydroponic Cultivation Using Public Grid and PVs as Energy Providers. *Sustainability* (Switzerland), 15(2). <https://doi.org/10.3390/su15021024>
- Mahlknecht, J., González-Bravo, R., & Loge, F. J. (2020). Water-energy-food security: A Nexus perspective of the current situation in Latin America and the Caribbean. *Energy*, 194. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116824>
- Martin, M., & Molin, E. (2019). Environmental assessment of an urban vertical hydroponic farming system in Sweden. *Sustainability* (Switzerland), 11(15). <https://doi.org/10.3390/su11154124>

- Martinez-Mate, M. A., Martin-Gorri, B., Martínez-Alvarez, V., Soto-García, M., & Maestre-Valero, J. F. (2018). Hydroponic system and desalinated seawater as an alternative farm-productive proposal in water scarcity areas: Energy and greenhouse gas emissions analysis of lettuce production in southeast Spain. *Journal of Cleaner Production*, 172, 1298–1310. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.275>
- Miralles-Wilhelm, F., & Muñoz-Castillo, R. (2018). An Analysis of the Water-Energy-Food Nexus in Latin America and the Caribbean Region: Identifying Synergies And Tradeoffs through Integrated Assessment Modeling I. BACKGROUND AND OBJECTIVES. <https://doi.org/10.9790/1813-07010825>
- Naresh, R., Jadav, S. K., Singh, M., Patel, A., Singh, B., Beese, S., & Pandey, S. K. (2024). Role of Hydroponics in Improving Water-Use Efficiency and Food Security. *International Journal of Environment and Climate Change*, 14(2), 608–633. <https://doi.org/10.9734/ijec/2024/v14i23976>
- Nederhoff, E., & Stanghellini, C. (2010). Water use efficiency of tomatoes-in greenhouses and hydroponics. www.waterfootprint.org
- Pomoni, D. I., Koukou, M. K., Vrachopoulos, M. G., & Vasiliadis, L. (2023). A Review of Hydroponics and Conventional Agriculture Based on Energy and Water Consumption, Environmental Impact, and Land Use. In *Energies* (Vol. 16, Number 4). MDPI. <https://doi.org/10.3390/en16041690>
- Report of the World Commission on Environment and Development "Our Common Future." (1987). <https://digitallibrary.un.org/record/139811?v=pdf>
- Resh, H. M. . (1997). Cultivos hidropónicos : nuevas técnicas de producción : una guía completa de los métodos actuales de cultivo sin suelo : para técnicos y agricultores profesionales, así como para los aficionados especializados (4ta. Edición). Ediciones Mundi-Prensa.
- Solomon, E. P., Berg, L. R., & Martin, D. W. (1996). Photosynthesis: Capturing Energy. In *Biology* (Fourth Edition, pp. 191–215). Saunders College Publishing.
- Taylor, R. W., Carandang, J. S., Alexander, C., & Calleja, J. S. (2012). MAKING GLOBAL CITIES SUSTAINABLE: URBAN ROOFTOP HYDROPONICS FOR DIVERSIFIED AGRICULTURE IN EMERGING ECONOMIES. *OIDA International Journal of Sustainable Development*.
- Turner, S., Pham, T. T. H., Ngô, H. T., & Zuberec, C. (2024). Rooftop gardening complexities in the Global South: Motivations, practices, and politics. *Geographical Research*, 62(2), 248–262. <https://doi.org/10.1111/1745-5871.12631>
- World Population Prospects: The 2017 Revision. (2017). <https://www.un.org/es/desa/world-population-projected-reach-98-billion-2050-and-112-billion-2100>

Recepción: 29.11.2025

Revisión: 30.12.2025

Publicación: 15.01.2026

<https://orcid.org/0000-0003-3693-0616>

GENES Y AMBIENTE: EL DÚO INVISIBLE DETRÁS DE MUCHAS ENFERMEDADES

GENES AND ENVIRONMENT: THE INVISIBLE DUO
BEHIND MANY DISEASES

Brenda Gamboa Loira^{1,2*}

¹) Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación.
Av. Insurgentes Sur 1582, Crédito Constructor,
Benito Juárez, C.P. 03940, Ciudad de México, México

²Facultad de Medicina, Universidad Autónoma de Yucatán.
Av. Itzáez 498, Centro, C.P. 97000, Mérida, Yucatán.

Contacto:

Teléfono: 9999240554 ext. 36136.

Correo:

brenda.gamboa@correo.uady.mx

Resumen

¿Por qué enfermamos? La respuesta no se encuentra solo en los genes ni únicamente en el ambiente, sino en la interacción entre ambos. Las enfermedades crónicas, hoy responsables de más del 70% de las muertes en el mundo, surgen de un diálogo constante entre lo que heredamos y lo que vivimos. Nuestros genes definen posibilidades, pero el ambiente (la alimentación, la contaminación, el estrés o las relaciones sociales) decide cuáles se activan. La epigenética ha revelado que estas influencias pueden incluso transmitirse a las siguientes generaciones. Las investigaciones realizadas en México muestran que la exposición a metales o plaguicidas puede afectar más a quienes poseen ciertas variantes genéticas, y que una buena nutrición puede atenuar esos efectos. Así, la salud no es un destino fijo, sino una construcción cotidiana y colectiva. Entender esta relación es clave para prevenir enfermedades y promover entornos más justos y saludables.

Palabras clave: Enfermedades crónicas; genética; ambiente; interacción gen-ambiente; epigenética.

Abstract

Why do we get sick? The answer lies not only in genes nor solely in the environment, but in the interaction between the two. Chronic diseases, currently responsible for more than 70% of deaths worldwide, arise from a constant dialogue between what we inherit and what we experience. Our genes define possibilities, but the environment (diet, pollution, stress, or social relationships) decides which ones are activated. Epigenetics has revealed that these influences can even be transmitted to subsequent generations. Research in Mexico shows that exposure to metals or pesticides can have a greater impact on those with certain genetic variants, and that good nutrition can mitigate these effects. Thus, health is not a fixed destiny, but a daily and collective construction. Understanding this relationship is key to preventing diseases and promoting more equitable and healthy environments.

Keywords: Chronic diseases; genetics; environment; gene-environment interaction; epigenetics.

Introducción

¿Por qué enfermamos?

A lo largo de la historia, los seres humanos hemos intentado responder a una pregunta que nos acompaña desde los orígenes de la medicina: ¿por qué enfermamos? Las respuestas han cambiado con el tiempo, de los castigos divinos a las bacterias invisibles y los genes, pero la interrogante sigue siendo la misma: ¿qué hace que un cuerpo deje de funcionar como debería?

Una enfermedad es una alteración del estado normal del cuerpo o de la mente que afecta nuestro bienestar físico, mental o social (Gonzalez-Fisher et al., 2025). Es decir, es un desequilibrio que impide que el organismo funcione correctamente o que la persona se sienta bien consigo misma o con su entorno.

Las enfermedades pueden clasificarse de distintas maneras. Una de las formas más comunes es según su duración y su causa (González-Fisher et al., 2025):

- Enfermedades agudas: aparecen de forma repentina y duran poco tiempo. Un resfriado o una infección gastrointestinal son ejemplos típicos.
- Enfermedades crónicas: se desarrollan lentamente, duran meses o años y, con frecuencia, acompañan a la persona durante gran parte de su vida. Entre ellas están la diabetes, la hipertensión, el cáncer o las enfermedades respiratorias.
- Enfermedades infecciosas: son causadas por microorganismos como virus, bacterias, hongos o parásitos, y pueden transmitirse entre personas, animales o por el ambiente.
- Enfermedades no infecciosas: no se deben a agentes externos vivos, sino a factores internos o ambientales, como la genética, la dieta, el estrés o la contaminación.

Hoy, gracias a los avances en medicina y saneamiento, las enfermedades infecciosas han disminuido notablemente en muchas regiones del mundo. Sin embargo, las enfermedades crónicas se han convertido en los nuevos protagonistas del panorama de la salud pública, representando más del 70% de las muertes en el mundo (OMS, 2025). Se las llama también “no transmisibles”, porque no se contagian, pero sus causas son igual de complejas y poderosas.

Las enfermedades crónicas suelen desarrollarse de forma silenciosa, casi imperceptible, hasta que ya están establecidas. A menudo no se deben a una sola causa, sino a una combinación de factores que interactúan entre sí que incluyen nuestros genes, nuestros hábitos y nuestro entorno. Es decir, no solo heredamos enfermedades, también las construimos día a día con lo que comemos, respiramos, sentimos y vivimos. Por ejemplo, una persona puede tener una predisposición genética a desarrollar hipertensión, pero si mantiene una dieta baja en sal, hace ejercicio y maneja bien el estrés, es posible que nunca llegue a enfermar. En cambio, otra persona sin esa predisposición podría desarrollarla si está expuesta a un ambiente de alta contaminación, estrés constante y mala alimentación.

La ciencia moderna ha revelado que nuestro cuerpo no es un destino fijo escrito en el ADN, es más bien una historia en construcción donde los genes y el ambiente dialogan constantemente. Lo que somos depende tanto de lo que heredamos como de lo que vivimos.

Así, entender por qué enfermamos no es solo cuestión de saber qué virus o gen está involucrado, sino de mirar en conjunto el entorno, los hábitos, las emociones y la historia personal de cada individuo. En los siguientes apartados exploraremos cómo estos elementos se entrelazan para dar forma a uno de los grandes desafíos de nuestra época, las enfermedades crónicas.

La contribución de nuestros genes

En el interior de cada célula de nuestro cuerpo se encuentra un universo diminuto de información, el genoma humano, una especie de biblioteca biológica que contiene las instrucciones para construir y mantener la vida. Este genoma está compuesto por aproximadamente 20,000 genes, cada uno con la función de fabricar las proteínas que permiten que el corazón lata, que el cerebro piense, que la piel cicatrice y que el sistema inmunológico nos proteja (Green, 2025).

Sin embargo, como en toda biblioteca, no todos los libros son idénticos. En cada persona existen variaciones genéticas, es decir, pequeñas diferencias en el ADN, que hacen que cada individuo sea único. Algunas de estas variaciones pueden influir en la probabilidad de desarrollar ciertas enfermedades, aunque es importante recordar que la genética ofrece posibilidades, no certezas. Es decir, tener una determinada variante

genética no significa que se desarrollará una enfermedad, sino que aumenta o disminuye la probabilidad de que eso ocurra, dependiendo también de otros factores, especialmente del ambiente.

Dentro de estas variaciones, la ciencia distingue entre mutaciones y polimorfismos genéticos. Una mutación es un cambio relativamente raro en el ADN que puede tener efectos importantes en el funcionamiento de una proteína o en la salud. Algunas mutaciones son dañinas, otras beneficiosas y muchas simplemente neutras. En cambio, un polimorfismo es una variación más común en la población (presente en más del 1% de las personas) y, en la mayoría de los casos, no causa enfermedades por sí mismo. No obstante, puede influir en la forma en que el cuerpo responde a ciertos factores ambientales o medicamentos (Figura 1) (Sameer et al., 2021).

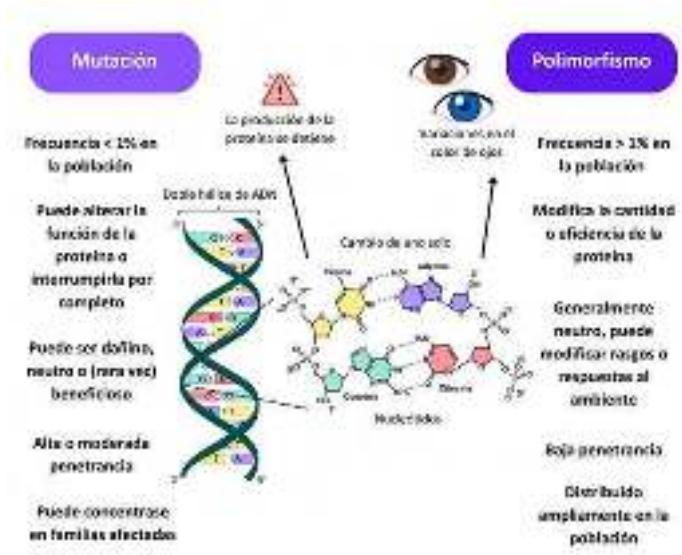


Figura 1. Diferencias entre mutaciones y polimorfismos (Elaboración propia).

Estas variaciones pueden clasificarse según su penetrancia, es decir, la probabilidad de que una persona portadora de una alteración genética manifieste realmente la enfermedad asociada. Así, existen genes de alta, moderada y baja penetrancia (Sapkota, 2014).

Los genes de alta penetrancia están fuertemente relacionados con ciertas enfermedades. En el caso del cáncer de mama, por ejemplo, entre el 84% y el 87% de las personas con mutaciones patológicas en los genes *BRCA1* y *BRCA2* desarrollan la enfermedad en algún momento de su vida. Estas mutaciones confieren un riesgo muy elevado y, aunque poco frecuentes, explican una fracción importante de los casos de cáncer hereditario.

En el grupo de penetrancia moderada se encuentran genes como *TP53*, llamado también “el guardián del genoma” por su papel esencial en la protección del ADN frente a daños y mutaciones. Las alteraciones en este gen incrementan el riesgo de cáncer, aunque en menor grado que *BRCA1* o *BRCA2*. En general, los genes de alta y moderada penetrancia confieren un riesgo heredado de entre 2.3% y 20%, dependiendo de la combinación de variantes y del contexto familiar.

La mayoría de estos genes son supresores de tumores, es decir, funcionan como frenos naturales que evitan que las células crezcan sin control. Cuando estos genes se dañan, el freno se

debilita y las células pueden multiplicarse de forma anormal.

Sin embargo, las mutaciones patogénicas en estos genes explican menos del 10% de todos los casos de cáncer de mama, lo que significa que la mayoría de los casos no se deben únicamente a la herencia genética.

Por otro lado, existen cientos o quizá miles de variantes de baja penetrancia. Estas son mucho más frecuentes en la población y, por sí solas, solo incrementan ligeramente el riesgo de enfermedad. Muchas de ellas se asocian con pequeñas modificaciones en el metabolismo o en la respuesta del organismo a estímulos externos, y para una gran parte aún no se conocen bien sus efectos funcionales o estructurales (Sapkota, 2014). Sin embargo, cuando varias de estas variantes se combinan y se exponen a ciertos factores ambientales, pueden aumentar de forma significativa la probabilidad de enfermar. En otras palabras, la herencia genética define las potencialidades, pero el ambiente influye en qué genes se activan o silencian, y en qué medida impactan en nuestra salud.

Comprender el papel de los genes no es aceptar un destino biológico, sino reconocer una parte del complejo entramado que nos hace vulnerables o resistentes a las enfermedades. La genética marca el punto de partida; el ambiente, como veremos en la siguiente sección, marca el rumbo.

La contribución del ambiente

El ambiente influye en nuestra salud de maneras más profundas y sutiles de lo que solemos pensar. No se limita al aire que respiramos, al clima que nos rodea o al agua que bebemos; también incluye lo que comemos, el lugar donde trabajamos, las relaciones sociales que cultivamos y hasta las oportunidades de acceder a servicios de salud. En conjunto, estos factores crean un entramado de condiciones que pueden protegernos o, por el contrario, predisponernos a enfermar.

Un ejemplo claro es la exposición a contaminantes ambientales. En regiones agrícolas, las personas que viven o trabajan cerca de zonas de fumigación suelen estar expuestas de manera continua a plaguicidas. Muchos de estos compuestos actúan como disruptores endocrinos, interfiriendo con la producción y acción de hormonas que regulan procesos como el crecimiento, la reproducción o el metabolismo (Figura 2) (Gore et al., 2015).

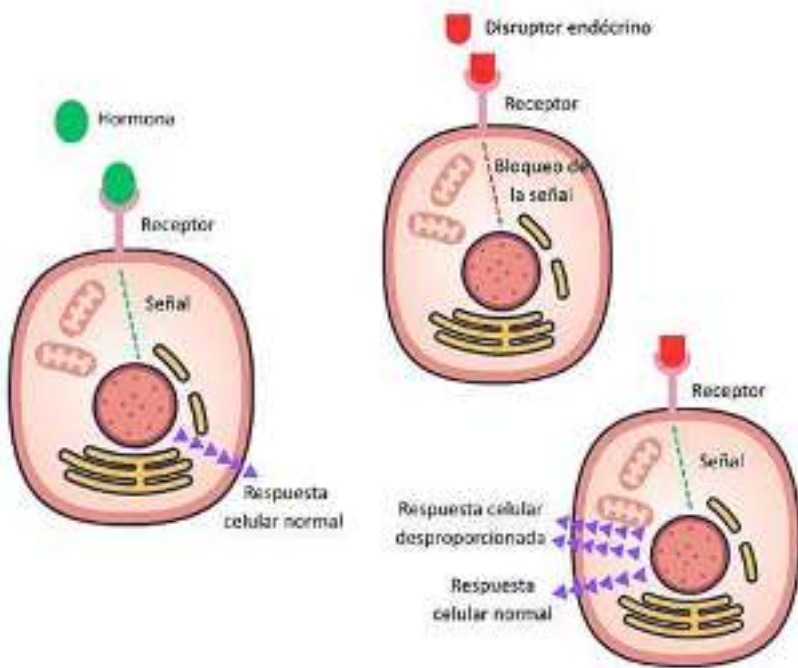


Figura 2. Acción de los compuestos disruptores endocrinos (Elaboración propia).

En zonas industriales o mineras, el contacto prolongado con metales como el arsénico, plomo o cadmio puede alterar la producción y función de proteínas y también generar especies reactivas (por ejemplo, de oxígeno), moléculas muy pequeñas e incompletas que buscan reaccionar con otras moléculas para estabilizarse. En este intento, pueden dañar las moléculas que componen las estructuras de las células, desde su ADN hasta las proteínas de sus membranas. Estas especies se producen de forma normal; sin embargo, cuando se generan en exceso o las defensas de las células no son suficientes, se acumulan y provocan lo que se llama estrés oxidativo, un proceso que puede contribuir al envejecimiento y al desarrollo de enfermedades (Figura 3) (Cheng et al., 2025).

Sin embargo, el ambiente no solo representa riesgo, también puede ser un aliado poderoso para la salud. La evidencia científica muestra que una dieta rica en frutas, verduras, granos integrales y antioxidantes modula positivamente la actividad de genes relacionados con la inflamación y la reparación celular (Gualtieri et al., 2023). Además, el acceso a espacios verdes urbanos y la práctica regular de actividad física reducen la presión arterial, fortalecen el sistema inmunológico y mejoran la salud mental (Nieuwenhuijsen et al., 2017).

Incluso los vínculos sociales influyen en la salud física, ya que las personas con redes de apoyo y solidaridad tienen niveles más bajos de cortisol, la hormona del estrés, y menor riesgo de mortalidad prematura (Uchino, 2006).

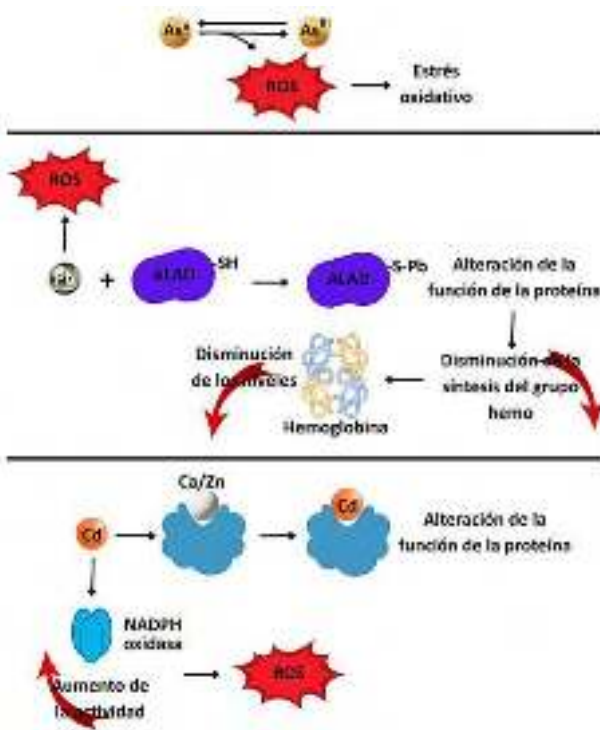


Figura 3. Acción tóxica de los metales pesados. As: Arsénico, Pb: Plomo, Cd: Cadmio, Ca: Calcio, Zn: Zinc, ROS: Especies reactivas de oxígeno, ALAD: Dehidratasa de ácido delta-aminolevulínico (Adaptado de Cheng et al., 2025) <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12365346/>.

Diversas intervenciones sobre el ambiente han demostrado ser útiles para prevenir o reducir los casos de enfermedades. En México, la eliminación progresiva del plomo en la gasolina y en los esmaltes cerámicos redujo significativamente los niveles de plomo en sangre en niños y adultos, disminuyendo los casos de intoxicación y sus secuelas neurológicas (Caravanos et al., 2014). En Bangladés, la instalación de pozos profundos libres de arsénico y el monitoreo comunitario del agua permitieron reducir la exposición crónica a este metal y, con ello, los casos de lesiones cutáneas (Chen et al., 2007; Majumdar et al., 2014).

En Estados Unidos, las políticas de control del tabaco se asociaron con una reducción sustancial de enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Anastasiou et al., 2025).

Estos logros ilustran una idea fundamental: el ambiente se puede cambiar, y con él, el rumbo de la salud humana. Por eso, las estrategias más efectivas de prevención en salud pública no se limitan a la atención médica, sino que buscan transformar los ambientes (mejorar el acceso a alimentos saludables, reducir la contaminación, crear espacios seguros para la actividad física y fortalecer la cohesión comunitaria). La salud, en este sentido, no es solo una cuestión de herencia, sino de contexto.

Y aquí emerge la gran pregunta, ¿qué ocurre cuando los genes y el ambiente se combinan? La respuesta nos llevará a comprender que la enfermedad no es producto de uno solo, sino del diálogo continuo entre ambos mundos.

Cuando los genes y el ambiente se combinan

Durante décadas, la ciencia debatió si las enfermedades eran producto de la herencia o del entorno. Hoy sabemos que la respuesta no está en elegir uno u otro, sino en comprender cómo dialogan entre sí. Nuestros genes son como un gran libro de instrucciones; contienen la información necesaria para que el cuerpo funcione, pero no todas las páginas se leen al mismo tiempo. El ambiente es, en cierto modo, el lector que decide qué capítulos abrir, cuáles marcar y cuáles dejar cerrados.

A este proceso lo conocemos como epigenética, una palabra que proviene del griego *epi* (encima de) y *genética* (referida a los genes). La epigenética estudia los cambios químicos que afectan la actividad de los genes sin alterar la secuencia del ADN (de Magalhães-Barbosa et al., 2022). En otras palabras, no cambia las letras del código genético, pero sí la forma en que ese código se interpreta.

Imaginemos el ADN como una partitura. Las notas son las mismas para todos, pero la manera de tocarlas, el ritmo, la intensidad, la emoción, puede cambiar por completo la melodía. El ambiente actúa como el director de orquesta; según las condicio-

nes en las que vivimos, puede subir el volumen de ciertos genes o bajarlo en otros.

Estos ajustes finos ocurren a través de mecanismos epigenéticos que funcionan como interruptores moleculares. Los principales son (Figura 4) (de Magalhães-Barbosa et al., 2022):

- La metilación del ADN es un proceso en el que se añaden pequeños grupos químicos (metilos) a determinadas zonas del ADN. Cuando un gen está muy metilado, suele quedar silenciado, es decir, su información no se utiliza para fabricar proteínas.
- Las modificaciones de las histonas, unas proteínas que actúan como carretes alrededor de los cuales se enrolla el ADN. Si las histonas están muy apretadas, el ADN queda inaccesible; si están sueltas, los genes pueden leerse con mayor facilidad.
- Los ARN no codificantes, ARN pequeños (miARN) o ARN largos (lncARN), que regulan la producción de proteínas al unirse al ARN mensajero, la molécula que lleva las instrucciones que están guardadas en nuestros genes hacia las fábricas de proteínas de la célula.

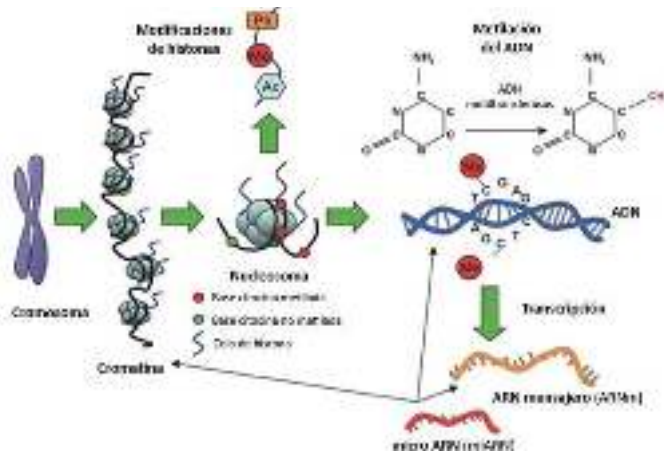


Figura 4. Tipos de modificaciones epigenéticas (de Magalhães-Barbosa et al., 2022)

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021755721001431>.

Gracias a la epigenética, sabemos que el ambiente deja huellas químicas en nuestro ADN. Algunas de esas marcas pueden incluso transmitirse de una generación a otra, lo que significa que las experiencias de una persona, su nutrición, su exposición a contaminantes o su nivel de estrés pueden influir en la salud de sus hijos o nietos.

Un ejemplo emblemático proviene de los estudios sobre la “hambruna holandesa” de 1944–1945, cuando miles de mujeres embarazadas sufrieron desnutrición durante la Segunda Guerra Mundial. Décadas después, se observó que sus hijos tenían mayor riesgo de desarrollar obesidad, diabetes y enfermedades cardiovasculares, probablemente debido a cambios epigenéticos en genes que regulan el metabolismo (Heijmans et al., 2008).

Otro caso, más esperanzador, muestra que estos cambios también pueden revertirse. Programas de intervención basados en dietas equilibradas, ejercicio y reducción del estrés han demostrado restaurar patrones de metilación del ADN alterados, reduciendo la inflamación y mejorando la función inmunológica (Gallardo-Escribano et al., 2020).

Genes sensibles al ambiente: evidencias desde la ciencia mexicana

Diversas investigaciones en el mundo y en México han explorado cómo los genes y el ambiente se entrelazan en el origen de enfermedades crónicas. Un ejemplo revelador proviene del norte de México, donde la actividad minera, el procesamiento de metales y la ganadería constituyen una fuente importante de ingresos, pero también han generado contaminación del suelo y del agua con arsénico, por ejemplo, que se ha convertido en un problema de salud pública persistente.

Las personas se exponen a estos contaminantes principalmente a través del consumo de agua y alimentos contaminados. En el caso del arsénico, una vez ingerido, se absorbe por la vía digestiva y se procesa, principalmente en el hígado, para ser convertido en formas que pueden ser fácilmente excretadas a través de la orina (Agency

for Toxic Substances and Disease Registry, 2007). De esta forma, la epigenética ofrece una nueva mirada sobre la salud; no somos simples herederos pasivos de nuestro ADN. Somos, en gran medida, coautores de nuestra biología.

Cada decisión diaria, desde lo que comemos hasta el aire que respiramos, puede modificar cómo se expresan nuestros genes.

Esta interacción entre genética y ambiente explica por qué, incluso entre personas con la misma predisposición hereditaria, algunas desarrollan una enfermedad y otras no. Es el resultado de un diálogo dinámico donde el ambiente traduce, modula y a veces corrige la información genética.

Por eso, cuando hablamos de prevenir enfermedades crónicas, no basta con conocer el genoma; debemos también cuidar el entorno. La epigenética nos enseña que el destino biológico no está escrito en piedra, sino en tinta que el ambiente puede reescribir. Y esa, quizá, sea una de las noticias más poderosas que la ciencia puede ofrecer; la salud se puede construir, incluso a nivel molecular.

for Toxic Substances and Disease Registry, 2007). Su procesamiento involucra la participación de nutrientes como el folato, las vitaminas B6 y B12; además de la acción de genes que producen enzimas capaces de transformar estos nutrientes en moléculas que donan grupos metilo al arsénico, entre ellos *FOLH1*, *MTHFR*, *MTHFD1*, *MTR* y *MTRR* (Figura 5) (Engström et al., 2009; Hall & Gamble, 2012).

Un estudio realizado en comunidades del norte de México mostró que las personas que consumían más vitamina B12 procesaban mejor el arsénico, pero que esta relación dependía de una variación en una sola letra de la secuencia del gen *FOLH1* (polimorfismo de un solo nucleótido). Quienes tenían la versión variante del gen obtenían un mayor beneficio de la vitamina B12,

ya que su cuerpo transformaba el arsénico de manera más eficiente que quienes no tenían esta variante (Gamboa-Loira et al., 2018). Este hallazgo evidencia que nutrición y genética trabajan en conjunto, modulando la capacidad del organismo para manejar sustancias tóxicas.

En otro estudio, se analizó si el cáncer de mama se relaciona con la capacidad de transformar el arsénico y si esta relación se modifica por variantes genéticas en los mismos genes que intervienen en la metilación (*AS3MT*, *FOLH1*, *MTHFR*, *MTHFD1*, *MTR* y *MTRR*). Se observó que algunas mujeres tenían una versión del gen *MTR* que las hacía más sensibles a los efectos del arsénico. Para estas mujeres, si su organismo convertía eficientemente el arsénico en formas menos dañinas, su riesgo de cáncer de mama disminuía; en cambio, si no lo procesaban bien, el riesgo aumentaba (Gamboa-Loira et al., 2017). Este hallazgo subraya que tanto la genética como la capacidad del cuerpo para procesar contaminantes son cruciales para entender la vulnerabilidad individual a enfermedades crónicas.

De manera complementaria, se ha identificado que variantes en genes relacionados con la desintoxicación de compuestos potencialmente cancerígenos, como *CYP1A1*, *CYP1B1* y *GSTM1*, pueden aumentar la susceptibilidad al cáncer de mama frente a exposiciones ambientales. Las mujeres con ciertas versiones de estos genes presentan mayor riesgo cuando están expuestas a metales como aluminio, arsénico, estaño o níquel, entre otros (Gamboa-Loira et al., 2022).

Estos estudios muestran que la salud no depende de un solo factor, sino de la intersección entre biología y ambiente. En contextos de vulnerabilidad ambiental como zonas rurales con agua contaminada, suelos afectados por metales o escaso acceso a alimentos nutritivos, la susceptibilidad genética puede amplificar los efectos de la exposición, haciendo que algunas personas sean más vulnerables que otras a los mismos riesgos.

La evidencia se extiende más allá del norte del país. En otras regiones, la contaminación por metales, plaguicidas o compuestos forma-

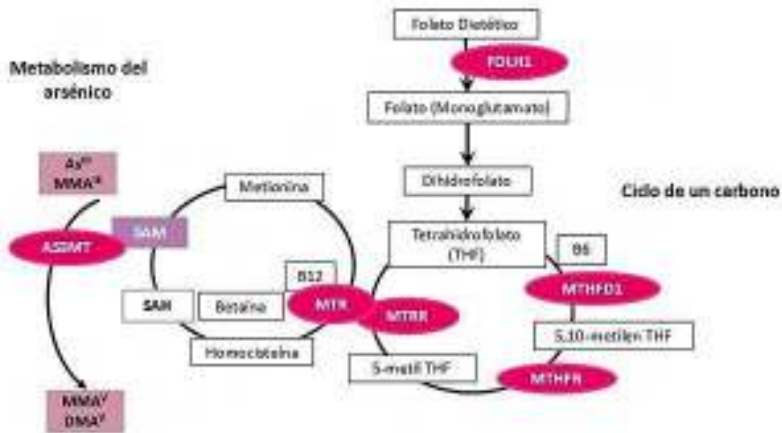


Figura 5. Ciclo de un carbono y metabolismo del arsénico. SAM: S-adenosilmetionina, SAH: S-adenosilhomocisteína. As: Arsénico, MMA: Arsénico con un grupo metilo, DMA: Arsénico con dos grupos metilo (Adaptado de Hall & Gamble, 2012) <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3317163/>.

dos durante la quema incompleta de materia orgánica combinada con variaciones genéticas influye en la probabilidad de desarrollar enfermedades crónicas (Medina-Sanson et al., 2020; Ochoa-Martínez et al., 2021).

En conjunto, estos hallazgos ilustran que la desigualdad ambiental también es desigualdad genética en potencia, porque no todos los cuerpos tienen las mismas herramientas para defenderse de los mismos contaminantes. Comprender estas interacciones nos invita a mirar la salud desde una perspectiva más amplia, considerando no solo lo que heredamos, sino también el entorno que habitamos y cómo podemos modificarlo.

Conclusión

Las enfermedades crónicas no son un destino escrito en los genes ni una consecuencia inevitable del entorno, sino el resultado de una compleja conversación entre ambos. La genética aporta la partitura, pero es el ambiente quien dirige la orquesta. A lo largo de este recorrido vimos cómo variaciones en genes específicos pueden hacer que algunas personas sean más

sensibles a contaminantes como los metales, y como factores ambientales, como la nutrición, la contaminación o el acceso a servicios de salud, pueden amplificar o atenuar esa vulnerabilidad.

Los hallazgos de la investigación en México muestran que el ambiente no solo influye en la salud, sino que es modificable. Mejorar la calidad del agua, promover una alimentación adecuada o reducir la exposición a contaminantes no son simples medidas técnicas, sino acciones que pueden reescribir la expresión de nuestros genes. Esta visión redefine la prevención, no se trata solo de detectar el riesgo, sino de transformar el contexto que lo produce.

En un país marcado por desigualdades sociales y ambientales, reconocer que la herencia genética interactúa con el entorno es también reconocer que la salud es una cuestión de justicia. Por eso, cada investigación que revela cómo los genes responden al ambiente es, en el fondo, una invitación a construir entornos más saludables y equitativos, donde nuestra genética no sea un límite, sino una posibilidad.

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 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

Cobos Ontiveros agradece a la Secretaría de Ciencias Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) antes CONACYT por la beca de Estancia Posdoctoral (CVU 623751). 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

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2007). Toxicological profile for arsenic (Número August). U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service.
- Anastasiou, E., Thorpe, L. E., Wyka, K., Elbel, B., Shelley, D., Kaplan, S., Burke, J., Kim, B., Newman, J., & Titus, A. R. (2025). Evaluation of Federally Mandated Smoke-Free Housing Policy and Health Outcomes Among Adults Over the Age of 50 in Low-Income, Public Housing in New York City, 2015-2022. *Nicotine & Tobacco Research: Official Journal of the Society for Research on Nicotine and Tobacco*, 27(9), 1566-1573. <https://doi.org/10.1093/ntr/ntaf046>
- Caravanos, J., Dowling, R., Téllez-Rojo, M. M., Cantoral, A., Kobrosly, R., Estrada, D., Orjuela, M., Gualtero, S., Ericson, B., Rivera, A., & Fuller, R. (2014). Blood lead levels in Mexico and pediatric burden of disease implications. *Annals of Global Health*, 80(4), 269-277. <https://doi.org/10.1016/j.aogh.2014.08.002>
- Chen, Y., van Geen, A., Graziano, J. H., Pfaff, A., Madajewicz, M., Parvez, F., Hussain, A. Z. M. I., Slavkovich, V., Islam, T., & Ahsan, H. (2007). Reduction in urinary arsenic levels in response to arsenic mitigation efforts in Araihaaz, Bangladesh. *Environmental Health Perspectives*, 115(6), 917-923. <https://doi.org/10.1289/ehp.9833>
- Cheng, Y., Zhao, Y., Chen, C., & Zhang, F. (2025). Heavy Metals Toxicity: Mechanism, Health Effects, and Therapeutic Interventions. *MedComm*, 6(9), e70241. <https://doi.org/10.1002/mco2.70241>
- de Magalhães-Barbosa, M. C., Prata-Barbosa, A., & da Cunha, A. J. L. A. (2022). Toxic stress, epigenetics and child development. *Jornal de Pediatria*, 98, S13-S18. <https://doi.org/10.1016/j.jpmed.2021.09.007>
- Engström, K. S., Nermell, B., Concha, G., Strömberg, U., Vahter, M., & Broberg, K. (2009). Arsenic metabolism is influenced by polymorphisms in genes involved in one-carbon metabolism and reduction reactions. *Mutation Research - Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 667(1-2), 4-14. <https://doi.org/10.1016/j.mrfmmm.2008.07.003>
- Gallardo-Escribano, C., Buonaiuto, V., Ruiz-Moreno, M. I., Vargas-Candela, A., Vilches-Perez, A., Benitez-Porres, J., Romance-Garcia, A. R., Ruiz-Moreno, A., Gomez-Huelgas, R., & Bernal-Lopez, M. R. (2020). Epigenetic approach in obesity: DNA methylation in a prepubertal population which underwent a lifestyle modification. *Clinical Epigenetics*, 12(1), 144. <https://doi.org/10.1186/s13148-020-00935-0>
- Gamboa-Loira, B., Cebrián, M. E., Salinas-Rodríguez, A., & López-Carrillo, L. (2017). Genetic susceptibility to breast cancer risk associated with inorganic arsenic exposure. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 56, 106-113. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2017.08.032>
- Gamboa-Loira, B., Hernández-Alcaraz, C., Gandolfi, A. J., Cebrián, M. E., Burguete-García, A., García-Martínez, A., & López-Carrillo, L. (2018). Arsenic methylation capacity in relation to nutrient intake and genetic polymorphisms in one-carbon metabolism. *Environmental research*, 164, 18-23. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.01.050>
- Gamboa-Loira, B., Mérida-Ortega, Á., Rothenberg, S. J., Cebrián, M. E., & López-Carrillo, L. (2022). Metal exposure and breast cancer among Northern Mexican women: Assessment of genetic susceptibility. *Environmental Science and Pollution Research International*, 29(59), 89002-89013. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21067-3>
- Gonzalez-Fisher, R. F., Rissman, S., & Prestridge, P. T. (2025). General concepts of disease. *Medical Research Archives*, 13(8). <https://doi.org/10.18103/mra.v13i8.6912>
- Gore, A. C., Chappell, V. A., Fenton, S. E., Flaws, J. A., Nadal, A., Prins, G. S., Toppari, J., & Zoeller, R. T. (2015). EDC-2: The Endocrine Society's Second Scientific Statement on Endocrine-Disrupting Chemicals. *Endocrine Reviews*, 36(6), E1-E150. <https://doi.org/10.1210/er.2015-1010>
- Green, E. (2025). Gene. *National Human Genome Research*. <https://www.genome.gov/genetics-glossary/Gene>

- Gualtieri, P., Marchetti, M., Frank, G., Smeriglio, A., Trombetta, D., Colica, C., Cianci, R., De Lorenzo, A., & Di Renzo, L. (2023). Antioxidant-Enriched Diet on Oxidative Stress and Inflammation Gene Expression: A Randomized Controlled Trial. *Genes*, 14(1), 206. <https://doi.org/10.3390/genes14010206>
- Hall, M. N., & Gamble, M. V. (2012). Nutritional manipulation of one-carbon metabolism: Effects on arsenic methylation and toxicity. *Journal of toxicology*, 2012, 595307. <https://doi.org/10.1155/2012/595307>
- Heijmans, B. T., Tobi, E. W., Stein, A. D., Putter, H., Blauw, G. J., Susser, E. S., Slagboom, P. E., & Lumey, L. H. (2008). Persistent epigenetic differences associated with prenatal exposure to famine in humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(44), 17046–17049. <https://doi.org/10.1073/pnas.0806560105>
- Majumdar, K. K., Ghose, A., Ghose, N., Biswas, A., & Mazumder, D. N. G. (2014). Effect of Safe Water on Arsenicosis: A Follow-up Study. *Journal of Family Medicine and Primary Care*, 3(2), 124–128. <https://doi.org/10.4103/2249-4863.137626>
- Medina-Sanson, A., Núñez-Enríquez, J. C., Hurtado-Cordova, E., Pérez-Saldivar, M. L., Martínez-García, A., Jiménez-Hernández, E., Fernández-López, J. C., Martín-Trejo, J. A., Pérez-Lorenzana, H., Flores-Lujano, J., Amador-Sánchez, R., Mora-Ríos, F. G., Peñaloza-González, J. G., Duarte-Rodríguez, D. A., Torres-Nava, J. R., Flores-Bautista, J. E., Espinosa-Elizondo, R. M., Román-Zepeda, P. F., Flores-Villegas, L. V., ... Jiménez-Morales, S. (2020). Genotype-Environment Interaction Analysis of NQO1, CYP2E1, and NAT2 Polymorphisms and the Risk of Childhood Acute Lymphoblastic Leukemia: A Report From the Mexican Interinstitutional Group for the Identification of the Causes of Childhood Leukemia. *Frontiers in Oncology*, 10, 571869. <https://doi.org/10.3389/fonc.2020.571869>
- Nieuwenhuijsen, M. J., Khreis, H., Triguero-Mas, M., Gascon, M., & Dadvand, P. (2017). Fifty Shades of Green: Pathway to Healthy Urban Living. *Epidemiology* (Cambridge, Mass.), 28(1), 63–71. <https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000000549>
- Ochoa-Martínez, Á. C., Araiza-Gamboa, Y., Varela-Silva, J. A., Orta-García, S. T., Carrizales-Yáñez, L., & Pérez-Maldonado, I. N. (2021). Effect of gene-environment interaction (arsenic exposure—PON1 Q192R polymorphism) on cardiovascular disease biomarkers in Mexican population. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 81, 103519. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2020.103519>
- OMS. (2025). Enfermedades no transmisibles. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/noncommunicable-diseases>
- Sameer, A. S., Bandy, M. Z., & Nissar, S. (2021). Mutations and Polymorphisms: What Is The Difference? En A. S. Sameer, M. Z. Bandy, & S. Nissar (Eds.), *Genetic Polymorphism and cancer susceptibility* (pp. 1–21). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-33-6699-2_1
- Sapkota, Y. (2014). Germline DNA variations in breast cancer predisposition and prognosis: A systematic review of the literature. *Cytogenetic and Genome Research*, 144(2), 77–91. <https://doi.org/10.1159/000369045>
- Uchino, B. N. (2006). Social support and health: A review of physiological processes potentially underlying links to disease outcomes. *Journal of Behavioral Medicine*, 29(4), 377–387. <https://doi.org/10.1007/s10865-006-9056-5>



NOTAS

RD-ICUAP

AÑO 12 NO. 34

<https://orcid.org/0000-0002-2445-1143>

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

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

VISITA DE LA DRA. LILIANA MAMMINO A LA BUAP

Andrea Moreno Ceballos¹, María
Eugenia Castro²,
Francisco J. Melendez³

¹Laboratorio de Simulaciones Moleculares Computacionales,
Facultad de Ciencias Químicas, BUAP, 72570, Puebla México

²Centro de Química del Instituto de Ciencias,
ICUAP, BUAP, 72570, Puebla, México

³Laboratorio de Química Teórica,
Facultad de Ciencias Químicas, BUAP, 72570, Puebla, México

Correos:

andrea.morenoce@alumno.buap.mx

mareug.castro@correo.buap.mx

francisco.melendez@correo.buap.mx

La Dra. Liliana Mammino es Profesora Emérita de la Universidad de Venda, en Thohoyandou, Sudáfrica, institución en la que ha trabajado desde 1997 y donde ha impulsado el desarrollo de la Química Teórica Computacional. Es licenciada en Química por la Universidad de Pisa, Italia, su país natal, y doctora en Química por la Universidad Estatal de Moscú, ambas con tesis en Química Teórica.

A pesar de haber nacido y crecido en la *bella Italia*, su pasión por lo exótico y su búsqueda

de aventuras la llevaron a África, donde su exuberancia, su gente y los retos de la enseñanza, la conquistaron para comenzar su trayectoria profesional y finalmente asentarse en Thohoyandou, ciudad cuyo nombre significa *cabeza de elefante* (Thohoyandou history, 2025). Su trayectoria profesional incluye la docencia en diversas instituciones del continente africano, entre ellas la Universidad Nacional de Somalia (1975), la Universidad de Zambia (1988–1992) y la Universidad Nacional de Lesotho (1993–1996) (Imagen 1).



Figura 1. Resumen de la semblanza de La Dra. Liliana Mammino

Su principal línea de investigación se centra en el estudio computacional de moléculas biológicamente activas. Asimismo, mantiene un profundo interés en la enseñanza de la química, particularmente en la comprensión conceptual, el papel del lenguaje en los procesos de enseñanza-aprendizaje y la educación para el desarrollo sostenible, así como en enfoques interdisciplinarios (Mammino, 2022; Mammino, 2024). La Dra. Mammino es autora de más de 200 publicaciones, que incluyen artículos en revistas arbitradas, actas de congresos, capítulos de libro y ocho libros de autoría propia. También ha sido editora o coeditora de siete obras colecti-

vas y actualmente trabaja en nuevos volúmenes. Es miembro del Comité Interdivisional de Química Verde para el Desarrollo Sostenible de la IUPAC. Ha sido galardonada con el Premio IUPAC a Mujeres Distinguidas en Química e Ingeniería Química en 2013, un premio de sociolingüística otorgado por la Asociación de Lenguas Africanas del Sur de África en 2016 y, más recientemente, la Medalla para la Educación Química concedida por la Sociedad Química de Sudáfrica en 2024.

La Dra. Mammino colabora con nuestro grupo de investigación del Laboratorio de Química Teórica (LabQT) de la Facultad de Ciencias Quí-

micas y el Centro de Química de la BUAP desde hace varios años, contando con artículos, capítulos de libro, revisiones de tesis y ponencias en congresos como resultado de investigaciones conjuntas (Moreno-Ceballos et al., 2024a; Moreno-Ceballos et al., 2024b). Ha visitado México en diversas ocasiones y ha estado en la BUAP dos veces: la primera en 2019, como ponente en la XVIII Reunión Mexicana de Físicoquímica Teórica, y la segunda en 2025, durante la XXIII edición del

mismo evento, ambas en la BUAP como destino final para realizar estancias académicas. Además, ha expresado su intención de regresar para continuar fortaleciendo la colaboración con nuestro grupo de investigación. En esta ocasión tuvimos la oportunidad de escuchar su conferencia titulada “Floroglucinoles acilados antioxidantes y el rol de los O–H fenólicos y del grupo acilo para esta actividad” (Figura 2 y 3) (<https://youtu.be/MDeRouiw-Uk>).







**EL LABORATORIO DE QUÍMICA TEÓRICA (LabQT) Y
 EL CUERPO ACADÉMICO BUAP-CA-263
 “INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL-COMPUTACIONAL DE
 NUEVOS MATERIALES Y SISTEMAS BIOMOLECULARES”**

INVITAN A LA CONFERENCIA TITULADA

**«FLOROGLUCINOLES ACILADOS
 ANTIOXIDANTES Y EL ROL DE LOS O–H
 FENOLICOS Y DEL GRUPO ACILO PARA
 ESTA ACTIVIDAD»**

 **FECHA**
 VIERNES 21 DE NOVIEMBRE
 2025

 **HORA**
 12:00 PM

 **LUGAR**
 AUDITORIO DEL
 CENTRO DE QUÍMICA
 ICUAP

Conferencista
Dra. Liliana Mammino
Professor Emeritus
University of Venda,
Thohoyandou, Sudáfrica



Figura 2. Cartel de invitación de la conferencia de la Dra. Liliana Mammino



Figura 3. Conferencia de la Dra. Liliana Mammino en el Centro de Química del ICUAP, BUAP.

Además de ser una gran investigadora y docente, la Dra. Liliana Mammino es una viajera incansable, inspirada por un deseo permanente de aprender. Disfruta de los países con una gran curiosidad y adaptación a las distintas circunstancias que se presentan durante sus estancias. Así, es posible verla en cualquier país bailando alegremente alguna canción popular, probando un plato típico, tomando numerosas fotografías, esforzándose por comunicarse en el idioma local y compartiendo anécdotas de su hogar en Sudáfrica rodeado de montañas. Es una persona profundamente jovial, para quien la edad solo es un número, pues cautiva con su gran alegría y entusiasmo, alentando siempre a los jóvenes —en especial a las jóvenes investigadoras— a continuar por el sendero de la Ciencia.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Dirección del Instituto de Ciencias (*ICUAP-BUAP*), a la Dirección General de Cómputo y Tecnologías de la Información y Comunicaciones (*DCyTIC-BUAP*) y a *RD-ICUAP BUAP* por las facilidades otorgadas para la difusión durante la estancia de la Dra. Liliana Mammino.

Referencias

- Mammino, L. (2022). 2 – Green chemistry: Chemistry working for sustainability. En: Mammino, L. (Ed.), *Advances in Green and Sustainable Chemistry, Green Chemistry and Computational Chemistry* (pp. 41–54). Elsevier. ISBN 9780128198797. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819879-7.00011-8>
- Mammino L. (2024) "Computational investigation of the influence of the acyl group on the reducing abilities of acylphloroglucinols". Book Title: Grabowski I., Stowik K., Maruani J., Brändas E. J. (Eds.), *Advances in Methods and Applications of Quantum Systems in Chemistry, Physics and Biology*. Book series: *Progress in Theoretical Chemistry and Physics*, Vol. 34. Springer, pp.243-269. https://doi.org/10.1007/978-3-031-52078-5_15
- Moreno-Ceballos, A., Castro, M.E., Caballero, N.A., Mammino, L., Melendez, F.J. (2024a). Implicit and explicit solvent effects on the global reactivity and the density topological parameters of the preferred conformers of caespitate. *Computation*, 12, 5. <https://doi.org/10.3390/computation12010005>
- Moreno-Ceballos, A., Caballero, N.A., Castro, M.E., Perez-Aguilar, J.M., Mammino, L., Melendez, F.J. (2024b). In silico approach: Anti-tuberculosis activity of caespitate in the H37Rv strain. *Current Issues in Molecular Biology*, 46, 6489–6507. <https://doi.org/10.3390/cimb46070387>
- Thohoyandou history – The head of the elephant. (2025). Disponible en: <https://southafrica.co.za/thohoyandou-history.html> (último acceso: 20 de noviembre de 2025).

<https://orcid.org/0009-0004-9045-7916>

INFANCIAS MEXICANAS LLEGAN A LA FINAL INTERNACIONAL DE LA OLIMPIADA MUNDIAL DE ROBÓTICA EN SINGAPUR

Damián F. Luna

Correos:

alejandro.alcazar@alumno.buap.mx

Puebla, México (4/Dic/2025)

— Jessica Díaz Álvarez y Blaze Yaeggy Sánchez, integrantes del Equipo *Garage* — *Quasar* se han colocado como finalistas internacionales en la edición 2025 de la Olimpiada Mundial de Robótica (WRO), celebrada en Singapur a finales de noviembre.

WRO (siglas en inglés de *World Robot Olympiad*) es una competencia global que reúne a más de 70 mil estudiantes de más de 100 países y promueve la creatividad, el ingenio y el talento juvenil en el ámbito de la robótica. Organizada por la *World Robot Olympiad Association*, la primera edición de la Olimpiada se celebró en 2004 en Singapur y reunió principalmente a equipos de países como China, Japón, Corea y naciones del sudeste asiático. Desde 2010 México forma parte de *WRO*; *WRO* México organiza año tras año eventos clasificatorios regionales, nacionales y envía su delegación a la final internacional.



Figura 1. Jessica y Blaze con sus uniformes de la delegación mexicana frente a Marina Bay, Singapur.



Figura 2. Vista nocturna de la ciudad de Singapur.

La final internacional de la edición 2025 tuvo un carácter especial al celebrarse en Singapur, país donde nació, hace más de 20 años, esta contienda internacional

En México —tan solo en la división *Elementary* (Primaria)— más de 100 equipos participaron en los distintos clasificatorios realizados en diversas ciudades del país, de los cuales solo alrededor de 30 clasificaron a la etapa nacional. El equipo conformado por Jessica y Blaze compitió en el clasificatorio celebrado en la ciudad de Oaxaca, Oaxaca a principios de junio del 2025, posicionándose dentro del top 3 y obteniendo así su pase al evento nacional. Dicho evento se celebró en Aguascalientes, Aguascalientes a mediados de septiembre del mismo año. Donde, tras colocarse en lo más alto del ranking nacional, el equipo fue abanderado como parte de la delegación mexicana para representar al país en la Final Internacional ¹.

Singapur recibió, del 26 al 28 de noviembre, a los mejores equipos de todo el mundo. El equipo *Garage - Quasar* compitió contra otros 98 equipos dentro de la categoría *RoboMission - Elementary*, que consiste en diseñar y programar un robot autónomo capaz de identificar elementos, tomar decisiones y resolver una serie de misiones previamente conocidas en el menor tiempo posible y enfrentar, en una segunda jornada, un nuevo set de misiones inéditas que exige adaptar el robot y la programación en un tiempo reducido.



Figura 3. El equipo Garage - Quasar tras obtener su pase a la Final Internacional en el Evento Nacional en Aguascalientes.



Figura 4. Jessica y Blaze durante la competencia en Singapur.

¹Para hacer posible su participación en esta etapa, el equipo contó con el apoyo del Gobernador de Puebla, Alejandro Armenta así como del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Morelos y donantes particulares.

El desafío presenta un alto grado de aleatoriedad, por lo que el robot debe ser capaz de tomar decisiones de forma autónoma y seguir distintos caminos según el escenario que se presente, lo que exige una adecuada comprensión y manejo de variables así como un enfoque de programación algorítmica para la resolución de problemas

Tras tres días de intensa competencia, Jessica y Blaze —como programadora e *ingeniero* respectivamente— culminaron su participación con una de las actuaciones más sobresalientes de la delegación mexicana, al sellar su posición dentro del top 50 mundial. Su experiencia en Singapur, sin embargo, les trae de vuelta a México con algo más que este hito para su club y su comunidad: la inspiración y conocimientos prácticos absorbidos al interactuar con equipos tan diversos de ese nivel competitivo. A esto se suman los vínculos y amistades forjados con otros jóvenes innovadores de alrededor del mundo, que tejen así una red de valor futuro incalculable que trasciende la competencia.

Durante la competencia, tuvieron la oportunidad de observar y aprender de primera mano los métodos y la disciplina que colocan a naciones como Malasia, China, Vietnam, o el propio Singapur, en la vanguardia de esta disciplina.

El equipo *Garage - Quasar* forma parte del club *Garage*, un espacio de formación en robótica educativa que opera en la zona oriente del estado de Morelos. Donde niñas, niños y adolescentes se preparan de manera continua a través de entrenamientos técnicos, trabajo en equipo y participación en competencias nacionales e internacionales. El proyecto, activo desde hace varios años, busca impulsar la educación STEM en las comunidades rurales y ayudar a fortalecer la presencia de México en el escenario internacional de la robótica educativa.

Alejandro Alcázar Aguilar y Fidel del Ángel Hernández Gadea, estudiantes de Ingeniería en Energías Renovables en la Facultad de Ciencias de la Electrónica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, dirigen este proyecto y se encargan de la formación técnica y prepara-

ción de los equipos. Su dedicación es voluntaria, motivada por su experiencia como antiguos integrantes del club.

Esta labor, más allá de los resultados competitivos, tiene un impacto directo en las infancias. La experiencia de competir en igualdad de condiciones con equipos de todo el mundo amplía sus expectativas personales y académicas. Este efecto se extiende también a sus entornos escolares y comunitarios, donde el logro se convierte en un referente cercano para otros niños y niñas, fortaleciendo la confianza colectiva, el interés por la ciencia y la tecnología, y la formación de aspiraciones vinculadas al desarrollo científico y tecnológico del país.



Figura 5. Integrantes del club *Garage*, equipos *Garage - Quasar* y *Garage - Nova*, durante su participación en el evento clasificatorio regional de Oaxaca.

Enlaces

<https://scoring.wro-association.org/en/event/scoring/293>

