

RD-ICUAP

ISSN 2448-5829
Año 11, No. 33-2025



Año 11 No. 33 Septiembre - Diciembre 2025
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 Castelán 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. B. 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 Ciencias Sociales y Humanidades (BUAP)

COMITÉ EDITORIAL EXTENDIDO

- Dra. María Lilia Cedillo Ramírez (BUAP)
Dra. Claudia Fabiola Martínez de la Peña (BUAP)
Dra. Margarita María 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)
DC Guadalupe Soto Rodríguez (FMBUAP)
Mtro. Jesús Eladio Barrientos Mora (FABUAP)

CORRECTORAS DE ESTILO LENGUA INGLESA

- 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)

RD-ICUAP

CINTILLO LEGAL
AÑO 11 NO. 33

RD – ICUAP Año 11, No. 33, septiembre–diciembre de 2025, 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 Ciencias, Dr. Enrique González Vergara y M.C. Beatriz Espinosa Aquino, fecha de la última modificación, agosto 2025.

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

EDITORIAL

AÑO 11 NO. 33

Nos complace saludar nuevamente a nuestros seguidores y al público en general. Con entusiasmo, les presentamos el número Año 11 No. 33 del año 2025 de nuestra revista, correspondiente al undécimo 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. Lo cual 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 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 2025. Seguramente nos sorprenden con su talento.

El contenido de esta edición del Año 11, No. 33, están a su disposición 18 contribuciones; 12 son artículos, 4 notas técnicas 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. El horario a consultar en la revista es 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 @IcuapRd en BlueSky [journal.bsky.social](https://bsky.social).

ISSN 2448-5829

Año 11, No. 33, 2025

RD-ICUAP

Agradecemos la portada al talento fotográfico de Carolayn Y. Martínez Lima, que nos permite apreciar la belleza de la mariposa monarca, perteneciente a la familia Danaide y su nombre científico es *Danaus plexippus* Linneo.

Agradecemos el esfuerzo de los alumnos de la Facultad de Arquitectura de la licenciatura en Diseño Gráfico del noveno semestre, Alejandra Abigail Tejeda Flores, Victoria Ocaña Lozano, Sebastián Morelos Ayaquica, Martha Guadalupe Bravo Barragán 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 3.ª convocatoria es del 20 de octubre al 15 de noviembre de 2025. 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

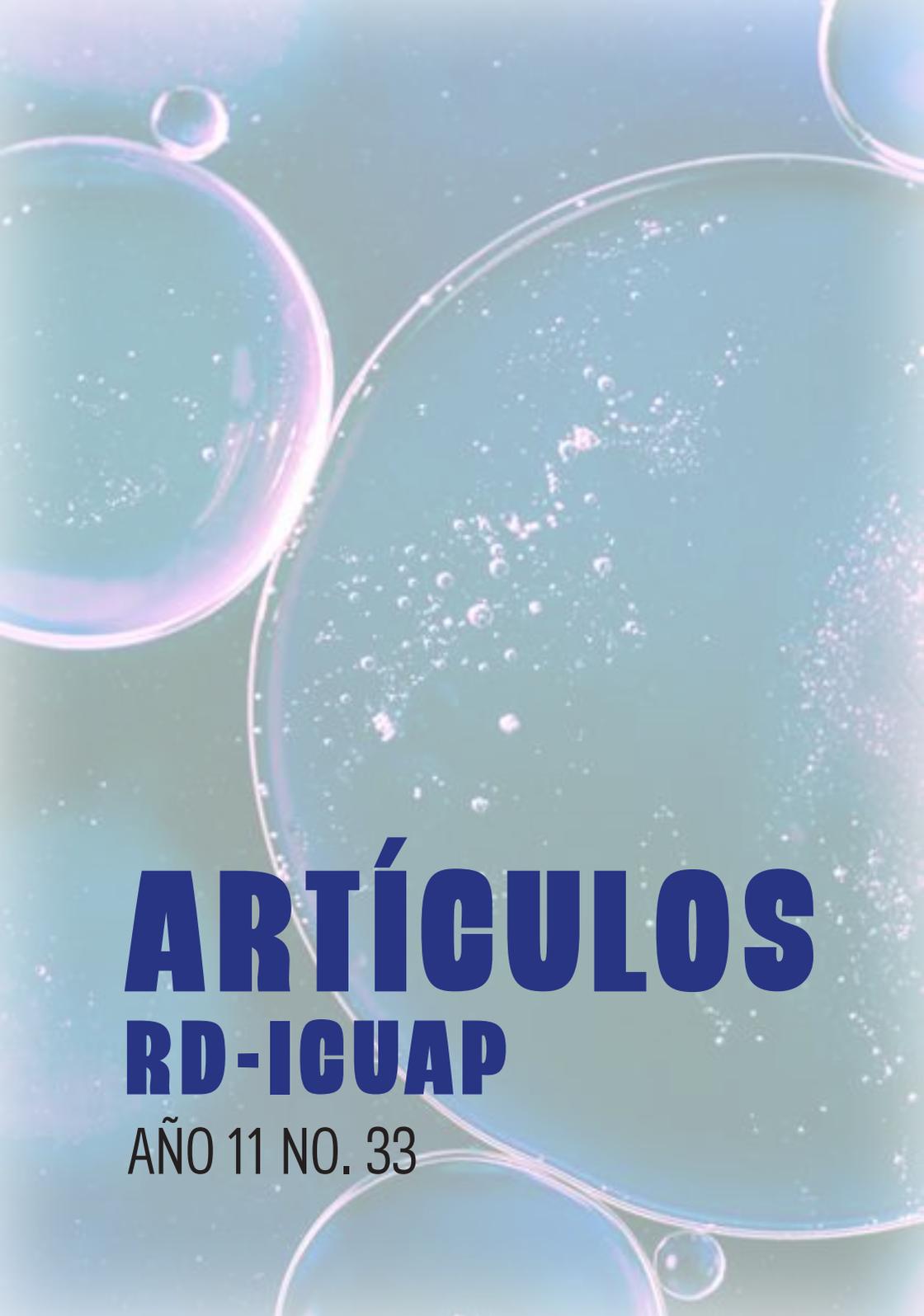
AÑO 11 NO. 33

PRESENTACIÓN Y
CONVOCATORIA

EDITORIAL

- | | |
|----------|--|
| 7 - 18 | DIAGNOSTICAR LA OBESIDAD
MÁS ALLÁ DEL PESO Y LA TALLA |
| 19 - 29 | ISOFLAVONAS DE SOYA: ¿UNA
NUEVA ESPERANZA PARA LAS
MADRES EN LACTANCIA? |
| 30 - 63 | REPERCUSIONES DE LA DIETA
SOBRE LA MICROBIOTA
INTESTINAL Y SU RELACIÓN
CON EFECTOS EN LA SALUD
PARTE 2 |
| 64 - 75 | LA CIENCIA DETRÁS DE LA
ELABORACIÓN DE UNA
CERÁMICA: UN ARTE CON
HISTORIA Y CONOCIMIENTO |
| 76 - 87 | CONEXIÓN ENTRE TRADICIÓN
Y CIENCIA: EL POTENCIAL
TERAPÉUTICO DE SOLANUM
VIARUM EN IXTEPEC, PUEBLA |
| 88 - 98 | FORMACIÓN DE PROFESORES
DE INGLÉS EN MÉXICO: EL
DESAFÍO DE LA LITERACIDAD
ACADÉMICA |
| 99 - 110 | FORRAJES NO-
CONVENCIONALES:
RECURSOS VEGETALES CON
GRAN POTENCIAL PARA LA
GANADERÍA DE LA PENÍNSULA
DE YUCATÁN |

111 - 124	HIDROGELES DINÁMICOS: EXPLORANDO SUS PROPIEDADES Y SU TRANSFORMACIÓN EN LA CIENCIA MODERNA
125 - 135	MATEMÁTICAS EN LA NATURALEZA
136 - 144	HELICOBACTER PYLORI: ¿ALIADA O ADVERSARIA?
145 - 166	ANÁLISIS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO. (1986-2016)
167 - 177	UNA AMENAZA SILENCIOSA: LA RESISTENCIA BACTERIANA A LOS ANTIBIÓTICOS
178 - 192	OLIMPIADA DE QUÍMICA EN PUEBLA, 35 AÑOS DE AVENTURAS Y RETOS
	NOTA TÉCNICA
194 - 204	INNOVANDO EL SÁNDWICH DE PEROVSKITA BARATO Y MÁS ESTABLE
205 - 222	PARCHES ELÉCTRICOS PARA OPTIMIZACIÓN EN LA CICATRIZACIÓN DE HERIDAS
223 - 232	DESARROLLO DE UN ELECTRODO PARA LA DETECCIÓN DE LACTATO ANTES Y DURANTE EL ESFUERZO FÍSICO
233 - 251	DISPOSITIVOS DE DETECCIÓN DE ESTRÉS BASADOS EN SEÑALES ÓPTICAS Y MONITORIZACIÓN DEL SUDOR
	NOTAS
253 - 254	DIVULGANDO LA IMPORTANCIA DE LOS MATERIALES QUE NOS AYUDAN A COMBATIR LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA
255 - 261	IN MEMORIAM JULIETA FIERRO (1948-2025)



ARTÍCULOS

RD-ICUAP

AÑO 11 NO. 33

DIAGNOSTICAR LA OBESIDAD MÁS ALLÁ DEL PESO Y LA TALLA

DIAGNOSING OBESITY BEYOND WEIGHT AND HEIGHT

Yael Taxis Suárez (1,2)
Samantha Rosas Martínez (1,3)
Mireya Montesano Villamil (4)
Sagrario Lobato Huerta* (1,5,6)

(1) Departamento de Investigación en Salud, Subdirección de Enseñanza e Investigación, Servicios de Salud del Estado de Puebla.

(2) Facultad de Medicina de la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla.

(3) Facultad de Medicina de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

(4) Departamento de Epidemiología del Hospital de la Mujer, Servicios de Salud IMSS-Bienestar-Puebla.

(5) Educación Superior. Centro de Estudios “Justo Sierra”.

(6) Clínica de Rehabilitación SportPhysiomedic, Lerdo de Tejada 103, San Pedro Cholula, Puebla.

Correos:

yael.taxis@upaep.edu.mx

samantha.rosasmart@alumno.buap.mx

dramontesano@yahoo.com.mx

sagrariolobato@cejus.edu.mx*

<https://orcid.org/0009-0000-5192-7074>

<https://orcid.org/0009-0007-5161-2591>

<https://orcid.org/0009-0004-8735-4780>

<https://orcid.org/0000-0001-8220-6819>

Folio: A11N74.25/990

Resumen

La obesidad constituye una crisis sanitaria global que afecta a adultos, niñas, niños y adolescentes en todas las regiones del mundo, con especial gravedad en América, donde se proyecta que más del 73% de los adultos vivan con esta condición para 2030. Aunque el Índice de Masa Corporal (IMC) ha sido el principal criterio diagnóstico, sus limitaciones, como la incapacidad para distinguir entre tipos de tejido o evaluar la distribución de la grasa corporal, han generado cuestionamientos sobre su utilidad clínica individual. En respuesta, la Comisión de The Lancet sobre Diabetes y Endocrinología propuso en 2025 una redefinición diagnóstica basada en la medición directa del exceso de tejido adiposo y sus consecuencias clínicas. Este enfoque promueve un diagnóstico más preciso al incorporar medidas complementarias como la circunferencia de cintura, el porcentaje de grasa corporal y la distribución adiposa. Además, introduce una nueva clasificación clínica que distingue entre obesidad preclínica y obesidad clínica, reconociendo los riesgos asociados incluso en ausencia de alteraciones metabólicas. Esta propuesta busca mejorar la práctica clínica y la salud pública mediante un abordaje personalizado y contextualizado que supere las limitaciones del IMC, facilitando así intervenciones más efectivas.

Palabras clave: Obesidad, diagnóstico, Índice de Masa Corporal (IMC), salud metabólica, Comisión sobre Diabetes y Endocrinología The Lancet.

Abstract

Obesity constitutes a global health crisis affecting adults, girls, boys, and adolescents in all regions of the world, with particular severity in the Americas, where it is projected that more than 73% of adults will live with this condition by 2030. Although Body Mass Index (BMI) has been the primary diagnostic criterion, its limitations—such as the inability to distinguish between tissue types or assess body fat distribution—have raised questions about its clinical utility at the individual level. In response, The Lancet Diabetes & Endocrinology Commission proposed in 2025 a diagnostic redefinition based on the direct measurement of excess adipose tissue and its clinical consequences. This approach promotes a more accurate diagnosis by incorporating complementary measures such as waist circumference, body fat percentage, and adipose distribution. Additionally, it introduces a new clinical classification that distinguishes between preclinical and clinical obesity. Preclinical obesity is characterised as a stage where excess adipose tissue is present, but metabolic alterations have not yet been observed. Clinical obesity, on the other hand, is characterised by the presence of both excess adipose tissue and metabolic alterations. This proposal aims to enhance clinical practice and public health by adopting a personalised and contextualised approach that addresses the limitations of BMI, thereby facilitating more effective interventions.

Keywords: Obesity, diagnosis, Body Mass Index (BMI), metabolic health, The Lancet Diabetes & Endocrinology Commission.

Introducción

La obesidad se ha convertido en una crisis global de salud pública que afecta a millones de personas en todo el mundo. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), en 2022 aproximadamente 890 millones de adultos y 160 millones de niñas, niños y adolescentes padecían obesidad (OMS, 2024). La situación es particularmente grave en el continente americano, donde la Organización Panamericana de la Salud (OPS) reporta que el 67.5% de la población adulta y el 37.6% de los menores entre 5 y 19 años tienen obesidad (OPS & OMS, 2025). Proyecciones recientes indican que para el año 2030 más del 73% de los adultos en esta región podrían vivir con esta condición, lo que implica un reto considerable para los sistemas de salud, dada la asociación estrecha con enfermedades crónicas como diabetes tipo 2, hipertensión arterial y enfermedades cardiovasculares (Lecube, 2024).

En particular, Estados Unidos y México destacan como los países con las mayores tasas de obesidad a nivel mundial. En Estados Unidos, el análisis de datos de la National Health and Nutrition Examination Survey entre 2021 y 2023 reveló que el 40.3% de los adultos padecían obesidad (Emmerich et al., 2024). En México, la Encuesta Nacional de Salud y Nutrición (ENSANUT, 2020–2023) informó que el 37% de los adultos tiene obesidad, con una mayor prevalencia en mujeres (41%) que en hombres (33%) (Barquera et al., 2024). Estas cifras reflejan la urgente necesidad de revisar y mejorar los criterios diagnósticos y los enfoques de tratamiento para esta condición.

En este contexto, la Comisión de The Lancet sobre Diabetes y Endocrinología (CCO, por sus siglas en inglés), en su reporte publicado en enero de 2025 (Rubino et al., 2025), presenta una propuesta innovadora para redefinir el diagnóstico de la obesidad. Esta propuesta va más allá del peso corporal y el Índice de Masa Corporal (IMC), y busca un enfoque más integral, centrado en la identificación precisa del exceso de tejido adiposo y sus consecuencias clínicas. El objetivo de este artículo es dar a conocer esta nueva definición y discutir sus implicaciones

para la práctica clínica y la salud pública, promoviendo un diagnóstico más preciso y un abordaje personalizado que pueda mejorar los resultados en salud.

¿Cómo se diagnostica hoy la obesidad?

El diagnóstico de la obesidad se basa en criterios específicos que han sido establecidos y adoptados por organismos internacionales de salud. En esta sección, revisaremos los conceptos y herramientas que actualmente guían la identificación de esta condición, así como sus principales ventajas y limitaciones.

Diagnóstico de obesidad según la Organización Mundial de la Salud

La OMS y la OPS definen la obesidad como una acumulación anormal o excesiva de tejido adiposo que puede afectar la salud (Figura 1). Para diagnosticarla, se emplea principalmente el Índice de Masa Corporal (IMC), una medida antropométrica calculada dividiendo el peso en kilogramos entre el cuadrado de la estatura en metros. Con base en el IMC, se establecen categorías que van desde bajo peso, peso normal y sobrepeso, hasta obesidad, la cual se clasifica en tres grados I, II y III. La obesidad se diagnostica cuando el IMC es igual o superior a 30 kg/m² (OMS, 2024; OPS & OMS, 2025a).

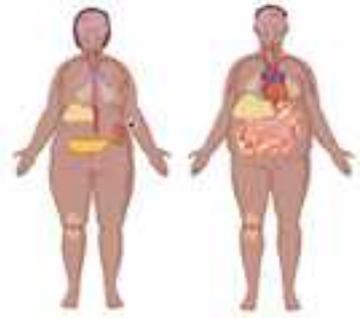


Figura 1. Imagen ilustrativa de personas de sexo femenino y masculino con obesidad, señalando los principales órganos afectados. Imagen diseñada con BioRender (<https://www.biorender.com/>).

Un índice con raíces en el siglo XIX

El IMC tiene un origen histórico que se remonta a 1835, cuando el estadístico belga Adolphe Quetelet (Figura 2), propuso el llamado "Índice de Quetelet" en su obra *Sur l'homme et le développement de ses facultés, ou Essai de physique sociale* (Pray & Riskin, 2023). Quetelet, que combinaba conocimientos de matemáticas, astronomía y estadística, buscaba describir al "hombre promedio" mediante una fórmula que relacionaba peso y estatura, sin intención clínica.

Fue hasta mediados del siglo XX que este índice comenzó a usarse para fines médicos. En 1950, Louis I. Dublin desarrolló tablas que definían el peso normal según el tipo corporal (pequeño, mediano y grande), y en 1972, el fisiólogo Ancel Keys validó el uso del IMC y le dio su nombre actual (Pray & Riskin, 2023).



Figura 2. Imagen ilustrativa de Adolphe Quetelet (1796-1874) (Fernández & Tamaro, 2004).

Limitaciones del IMC: Más allá del número

Aunque el IMC ha sido una herramienta útil para la vigilancia epidemiológica a nivel poblacional, presenta importantes limitaciones cuando se aplica a la evaluación individual. No distingue entre los diferentes tipos de tejido corporal ni permite identificar la distribución de la grasa, un aspecto fundamental para evaluar el riesgo metabólico y cardiovascular. En particular, la grasa abdominal se ha asociado con un mayor riesgo de resistencia a la insulina, enfermedades metabólicas y complicaciones cardiovasculares, en contraste con la grasa localizada en caderas y muslos (Pray & Riskin, 2023).

Asimismo, los puntos de corte del IMC que definen sobrepeso y obesidad no

son universales. Por ejemplo, en poblaciones asiáticas se ha documentado que enfermedades como la diabetes tipo 2 y las afecciones cardiovasculares pueden desarrollarse con valores de IMC inferiores a los umbrales establecidos por la OMS (WHO Expert Consultation, 2004). Por ello, la evaluación clínica del paciente con obesidad debe complementarse con otras herramientas que permitan analizar la composición corporal y el perfil metabólico, para identificar con mayor precisión el riesgo individual y diseñar intervenciones más efectivas. Esta realidad subraya la necesidad de adaptar los criterios diagnósticos según las características genéticas, ambientales y socioculturales propias de cada población.

La paradoja de la obesidad: ¿obesidad saludable?

En años recientes, se ha planteado la distinción entre obesidad metabólicamente saludable y obesidad no saludable (Simati et al., 2023; Li et al., 2024). Esta idea surge al identificar grupos de personas con IMC ≥ 30 que no presentan alteraciones metabólicas típicas como hipertensión, dislipidemia o resistencia a la insulina (Tanriover et al., 2023).

Sin embargo, esta aparente "salud metabólica" no garantiza la ausencia de complicaciones a largo plazo. Estudios de seguimiento han mostrado que muchas personas con obesidad metabólicamente saludable desarrollan con el tiempo trastornos metabólicos, cuestionando la estabilidad y la utilidad clínica de esta clasificación (Reinisch et al., 2025).

Hacia un diagnóstico integral de la obesidad

El diagnóstico tradicional basado en el IMC continúa siendo la referencia principal para identificar la obesidad. Sin embargo, resulta indispensable complementarlo con evaluaciones más detalladas que consideren la distribución de la grasa corporal, el estado metabólico y el riesgo cardiovascular individual. Solo mediante un enfoque integral es posible ofrecer un manejo personalizado que aborde tanto el exceso de tejido adiposo como sus implicaciones para la salud, evitando así la subestimación de riesgos o la generación de falsas seguridades.

Diagnóstico de obesidad según la Comisión de The Lancet sobre Diabetes y Endocrinología

La CCO propone un enfoque diagnóstico más integral y preciso, centrado en la identificación del exceso de tejido adiposo como criterio principal (Figura 3). Aunque las estrategias antropométricas recomendadas por la CCO son fundamentales, el diagnóstico clínico debe iniciarse con una entrevista médica detallada, conforme a la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SSA3-2012 (2012). Esta etapa inicial permite establecer la sospecha diagnóstica mediante los signos y síntomas referidos por la persona, orientados según los criterios clínicos de la CCO, descritos posteriormente (Figura 4).

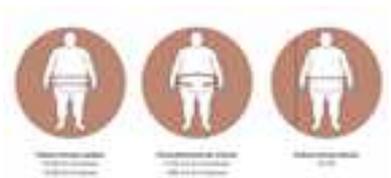


Figura 3. Imagen ilustrativa sobre las estrategias antropométricas para medir el exceso de grasa corporal según la CCO. Imagen diseñada en BioRender (<https://www.biorender.com/>) basado en Rubino et al., 2025.

Una vez planteada la sospecha, se procede a la exploración física, utilizando mediciones antropométricas que estimen la cantidad y distribución del tejido adiposo. Estas mediciones deben seguir las normas nacionales, enriquecidas con los lineamientos internacionales de la CCO, para lograr una evaluación más completa del estado nutricional y metabólico. La CCO enfatiza que el IMC debe reservarse para la vigilancia poblacional y no emplearse como único criterio diagnóstico individual, pues no distingue el tejido adiposo de otros tipos de tejidos, ni identifica su distribución corporal (Rubino et al., 2025). Por ello, sugiere un sistema complementario que incluye:

- Al menos una medida del tamaño corporal (circunferencia de cintura, relación cintura-cadera o cintura-alta), además del IMC.

- Al menos dos medidas del tamaño corporal, independientemente del IMC.
- Medición directa del porcentaje de grasa corporal mediante técnicas como la absorciometría dual de rayos X (DEXA), sin depender del IMC.
- En casos con IMC extremadamente elevados (>40 kg/m²), se asume razonablemente un exceso significativo de tejido adiposo.

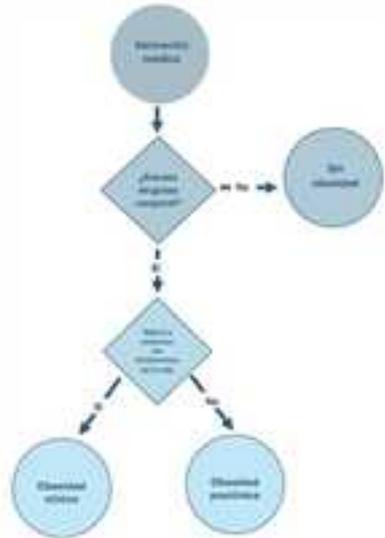


Figura 4. Flujoograma para el diagnóstico de obesidad clínica y obesidad preclínica según la CCO Imagen diseñada en BioRender (<https://www.biorender.com/>) con base en información de Rubino et al. 2025.

Estos criterios permiten una aproximación diagnóstica más precisa, al centrarse en la cantidad real de tejido adiposo, no solo en la relación peso-talla. Para mantener una composición corporal saludable, el porcentaje de grasa corporal no debe superar el 20% en hombres ni el 25% en mujeres (Macek et al., 2020). La inclusión de múltiples parámetros ofrece una visión detallada del estado de salud y permite diferenciar un peso elevado por masa muscular de un exceso patológico de grasa.

Nueva clasificación clínica de la obesidad según la CCO

La CCO propone una clasificación clínica con dos categorías principales (Figura 5) (Rubino et al., 2025):

- **Obesidad preclínica:** Personas con exceso de grasa corporal, pero sin disfunciones metabólicas ni limitaciones funcionales evidentes. Corresponde al antiguo concepto de "obesidad metabólicamente saludable". A pesar de la ausencia de manifestaciones clínicas, este perfil implica un mayor riesgo de desarrollar enfermedades crónicas, como diabetes tipo 2 y enfermedad cardiovascular.
- **Obesidad clínica:** Casos en los que el exceso de grasa genera alteraciones orgánicas o funcionales, manifestándose con signos, síntomas o limitaciones en la vida diaria. Esta categoría reemplaza el término "obesidad metabólicamente patológica" y refleja un estado avanzado de disfunción relacionada con la adiposidad.

Este modelo subraya que la obesidad es una enfermedad crónica, compleja y multifactorial, no solo una condición determinada por el peso corporal. La propuesta representa un avance hacia un abordaje clínico centrado en la persona, sensible al contexto y basado en evidencia científica.

Síntomas para identificar la obesidad como condición clínica

La CCO establece 18 criterios sintomatológicos para personas adultas y 13 para niñas, niños y adolescentes (Rubino et al., 2025). El reconocimiento temprano de estos signos y síntomas por el personal de salud permite intervenciones oportunas y centradas en la persona. Los criterios diagnósticos en personas adultas, presentados en la Figura 6, incluyen diversas manifestaciones clínicas asociadas con el exceso de tejido adiposo, estos son:

1. Disnea o dificultad para respirar, provocada por la acumulación de grasa en el tórax y el abdomen, que limita la expansión pulmonar.
2. Insuficiencia cardíaca relacionada con la obesidad, es decir, el deterioro en la capacidad del corazón para bombear sangre de manera eficiente.
3. Dolor crónico en rodillas o caderas, acompañado de rigidez articular, debido a la sobrecarga que el peso corporal ejerce sobre las articulaciones.
4. Disfunción renal, o alteración en el funcionamiento de los riñones, vinculada con el exceso de grasa corporal.

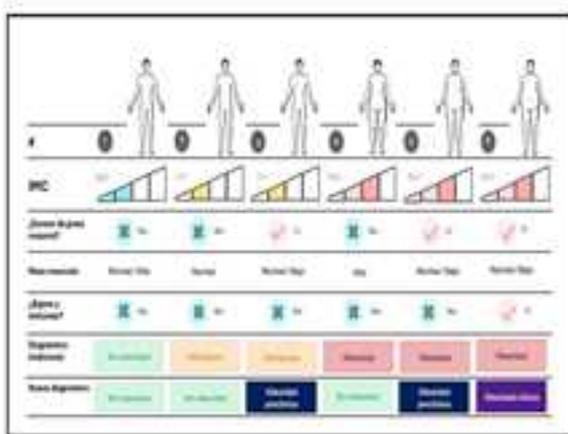


Figura 5. Nuevos criterios diagnósticos de obesidad según la Comisión de The Lancet sobre Diabetes y Endocrinología. Diseño realizado en BioRender (<https://www.biorender.com/>) con información de Rubino et al. 2025.

5. Síntomas respiratorios del tracto superior, como ronquidos fuertes, pausas en la respiración durante el sueño (apnea del sueño), tos persistente o cambios en la voz (disfonía).

6. Alteraciones metabólicas, como la resistencia a la insulina (cuando las células dejan de responder adecuadamente a esta hormona), diabetes tipo 2, niveles anormales de grasas en sangre (dislipidemia) o síndrome metabólico, caracterizado por obesidad en la zona abdominal, presión arterial alta y niveles elevados de glucosa.

7. Afectaciones neurológicas, incluyendo daño en los nervios periféricos (neuropatía), compresión de nervios, como en el síndrome del túnel carpiano o disminución en las capacidades cognitivas, como la memoria o la atención.

8. Problemas del sistema urinario, como infecciones frecuentes de vías urinarias, pérdida involuntaria de orina (incontinencia), urgencia urinaria o sensación de vaciado incompleto de la vejiga.

9. Disfunción reproductiva, que puede incluir el síndrome de ovario poliquístico, irregularidades menstruales, ausencia de menstruación (amenorrea), infertilidad en hombres por bajo conteo de espermatozoides o disminución del deseo sexual.

10. Linfedema en las extremidades inferiores, es decir, acumulación de líquido linfático que genera hinchazón persistente.

11. Dificultad para realizar actividades cotidianas, como bañarse, vestirse o desplazarse.

12. Fatiga persistente, o sensación continua de cansancio sin causa aparente.

13. Trastornos del sueño, especialmente la apnea obstructiva, que interrumpe el descanso nocturno.

14. Afecciones dermatológicas en zonas de fricción o pliegues cutáneos, como el intertrigo (inflamación por

humedad) o la acantosis nigricans, una coloración oscura y aterciopelada de la piel.

15. Alteraciones endocrinas, o desequilibrios hormonales que afectan distintas funciones del organismo.

16. Trastornos gastrointestinales, como digestión lenta, reflujo ácido o estreñimiento.

17. Complicaciones hepáticas, como el hígado graso, que implica acumulación de grasa en este órgano.

18. Alteraciones psicológicas o cognitivas, que pueden manifestarse como ansiedad, depresión o deterioro en la capacidad para realizar tareas diarias.



Figura 6. Imagen ilustrativa de signos y síntomas de la obesidad clínica. Imagen diseñada en Bio-Render (<https://www.biorender.com/>) con base en información de Rubino et al. 2025.

En la población infantil, el exceso de tejido adiposo también puede asociarse con diversas manifestaciones clínicas. Entre los principales criterios diagnósticos se encuentran:

1. Alteraciones músculo-esqueléticas, como dolor persistente en las extremidades o limitaciones en el movimiento, que pueden deberse a la carga excesiva sobre músculos y articulaciones en desarrollo.

2. Disfunción renal, es decir, dificultades en el funcionamiento de los riñones para eliminar desechos y regular el equilibrio de líquidos.

3. Síntomas respiratorios del tracto superior, como ronquidos intensos, pausas en la respiración durante el sueño (apnea) o congestión nasal persistente.

4. Alteraciones metabólicas, que incluyen resistencia a la insulina, aumento de la glucosa en sangre, elevación del colesterol o triglicéridos, o el desarrollo temprano de síndrome metabólico.

5. Disfunción neurológica, que puede manifestarse como dolores de cabeza frecuentes, trastornos en la coordinación o alteraciones en el aprendizaje y la atención.

6. Problemas urinarios, como infecciones frecuentes, urgencia para orinar o escapes involuntarios de orina (incontinencia).

7. Disfunción reproductiva, como la aparición adelantada de signos de pubertad (pubertad precoz) o ciclos menstruales irregulares en adolescentes.

8. Linfedema, es decir, hinchazón crónica de piernas o brazos por acumulación de líquido linfático.

9. Dificultad para realizar actividades diarias, como jugar, correr, vestirse o participar en actividades escolares con normalidad.

10. Fatiga persistente, o cansancio constante, incluso después de descansar.

11. Trastornos del sueño, como insomnio o interrupciones frecuentes del descanso nocturno.

12. Afecciones dermatológicas, especialmente en pliegues de la piel, como irritaciones, infecciones por humedad o engrosamiento de la piel en ciertas zonas.

13. Alteraciones psicológicas o del desarrollo, que pueden incluir cambios en el estado de ánimo, ansiedad, baja autoestima, síntomas depresivos o dificultades en el desarrollo cognitivo y emocional.

Cómo actuar ante la obesidad

El abordaje de la obesidad varía según el estadio clínico en el que se encuentre la persona. En el caso de la obesidad preclínica, el objetivo principal es prevenir su progresión hacia una obesidad clínica o hacia enfermedades asociadas al exceso de peso corporal. Las acciones recomendadas incluyen el acompañamiento mediante consejería de salud enfocada en la pérdida de peso o en la prevención del aumento de peso. También es fundamental establecer un monitoreo regular de parámetros metabólicos, como niveles de glucosa, lípidos y presión arterial, a través de estudios periódicos. En personas con mayor riesgo de desarrollar complicaciones, pueden ser necesarias intervenciones activas orientadas a reducir peso de forma segura y sostenida (Rubino et al., 2025).

En la etapa de obesidad clínica, el tratamiento debe ser más intensivo y personalizado. El enfoque terapéutico se orienta principalmente a mejorar o revertir el funcionamiento de los órganos afectados. Para lograrlo, suele indicarse una combinación de intervenciones, que puede incluir tratamiento farmacológico y un abordaje multidisciplinario que involucre profesionales de medicina, nutrición, psicología y actividad física. La selección del tratamiento debe basarse en una evaluación individual del perfil de riesgos y beneficios, y acordarse de manera conjunta con la persona interesada. Más allá del número de kilogramos perdidos, el éxito del tratamiento debe medirse en función de la mejora clínica observada, es decir, en la reducción de signos y síntomas asociados al estado de salud general (Rubino et al., 2025).

Conclusiones

La obesidad es una enfermedad compleja, progresiva y multisistémica, que no puede reducirse únicamente al exceso de peso corporal. Su impacto en la salud muchas veces se manifiesta a través de disfunciones orgánicas antes de que exista un aumento significativo del peso, por lo que es fundamental reconocerla desde una perspectiva clínica más amplia y centrada en el funcionamiento del organismo.

Adoptar una clasificación basada en la disfunción de órganos permite identificar con mayor precisión a las personas que requieren atención, evitar retrasos en el diagnóstico y promover intervenciones más oportunas y eficaces. Este enfoque

también contribuye a disminuir el estigma que históricamente ha rodeado a esta enfermedad, al desplazar la atención del juicio estético o del número en la báscula hacia los efectos reales sobre la salud. Esperamos que organismos internacionales como la Organización Mundial de la Salud consideren, en un futuro cercano, la propuesta de la Comisión de The Lancet sobre Diabetes y Endocrinología como una guía para redefinir los criterios diagnósticos y terapéuticos de la obesidad. Este cambio representa una oportunidad para transformar la forma en que se comprende y se aborda esta enfermedad, con una mirada integral, ética y basada en la evidencia.

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.

Conflicto de interés

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

Agradecimientos

Expresamos nuestro profundo agradecimiento al Departamento de Investigación en Salud de los Servicios de Salud de Puebla por su invaluable apoyo en nuestro desarrollo profesional y en la elaboración de este artículo de divulgación.

Referencias

- Barquera, S., Hernández-Barrera, L., Oviedo-Solís, C., Rodríguez-Ramírez, S., Monterrubio-Flores, E., Trejo-Valdivia, B., Martínez-Tapia, B., Aguilar-Salinas, C., Galván-Valencia, O., Chávez-Manzanera, E., Rivera-Dommarco, J., & Campos-Nonato, I. (2024). Obesidad en adultos. *Salud Pública de México*, 66, 414-424. <https://doi.org/10.21149/15863>
- Emmerich, S. D., Fryar, C. D., Stierman, B., & Ogden, C. L. (2024). Obesity and Severe Obesity Prevalence in Adults: United States, August 2021-August 2023. *NCHS data brief*, (508), 10.15620/cdc/159281. <https://doi.org/10.15620/cdc/159281>.
- Fernández, T. & Tamaro, E. (2004). "Biografía de Adolphe Quetelet" [Internet]. Barcelona, España: Editorial Biografías y Vidas. <https://www.biografiasyvidas.com/biografia/q/quetelet.htm>.
- Lecube A. (2024). Impacto de la obesidad y la diabetes en la salud y en la enfermedad cardiovascular [Impact of obesity and diabetes on health and cardiovascular disease]. *Atención Primaria*, 56(12), 103045. <https://doi.org/10.1016/j.aprim.2024.103045>
- Li, X., Zhang, X., Sun, L., Yang, L., Li, Q., Wang, Z., Wu, Y., Gao, L., Zhao, J., Guo, Q., & Zhou, M. (2024). Associations Between Metabolic Obesity Phenotypes and Pathological Characteristics of Papillary Thyroid Carcinoma. *Endocrine practice: Official Journal of the American College of Endocrinology and the American Association of Clinical Endocrinologists*, 30(7), 624–630. <https://doi.org/10.1016/j.eprac.2024.04.010>
- Macek, P., Biskup, M., Terek-Derszniak, M., Stachura, M., Krol, H., Gozdz, S., & Zak, M. (2020). Optimal Body Fat Percentage Cut-Off Values in Predicting the Obesity-Related Cardiovascular Risk Factors: A Cross-Sectional Cohort Study. *Diabetes, Metabolic Syndrome, and Obesity: Targets and Therapy*, 13, 1587–1597. <https://doi.org/10.2147/DMSO.S248444>.
- Organización Mundial de la Salud (2024). Obesidad y sobrepeso. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight>
- Organización Panamericana de la Salud & Organización Mundial de la Salud (2025). Nueve países de América Latina y el Caribe intensifican sus esfuerzos para frenar la obesidad, con el apoyo de la OPS. <https://www.paho.org/es/noticias/4-3-2025-nueve-paises-america-latina-caribe-intensifican-sus-esfuerzos-para-frenar#:~:text=El%20panorama%20actual%20es%20preocupante,será%20del%2073%2C%25>

Organización Panamericana de la Salud & Organización Mundial de la Salud (2025a). Prevención de la obesidad. <https://www.paho.org/es/temas/prevencion-obesidad>

Pray, R., & Riskin, S. (2023). The History and Faults of the Body Mass Index and Where to Look Next: A Literature Review. *Cureus*, 15(11), e48230. <https://doi.org/10.7759/cureus.48230>.

Reinisch, I., Ghosh, A., Noé, F., Sun, W., Dong, H., Leary, P., Dietrich, A., Hoffmann, A., Blüher, M., & Wolfrum, C. (2025). Unveiling adipose populations linked to metabolic health in obesity. *Cell metabolism*, 37(3), 640–655.e4. <https://doi.org/10.1016/j.cmet.2024.11.006>

Rubino, F., Cummings, D. E., Eckel, R. H., Cohen, R. V., Wilding, J. P. H., Brown, W. A., Stanford, F. C., Batterham, R. L., Farooqi, I. S., Farpour-Lambert, N. J., le Roux, C. W., Sattar, N., Baur, L. A., Morrison, K. M., Misra, A., Kadowaki, T., Tham, K. W., Sumithran, P., Garvey, W. T., Kirwan, J. P., ... Mingrone, G. (2025). Definition and diagnostic criteria of clinical obesity. *The Lancet. Diabetes & Endocrinology*, 13(3), 221–262. [https://doi.org/10.1016/S2213-8587\(24\)00316-4](https://doi.org/10.1016/S2213-8587(24)00316-4)

Secretaría de Salud. (2012). NORMA Oficial Mexicana NOM-004-SSA3-2012, Del expediente clínico. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5272787&fecha=15/10/2012

Simati, S., Kokkinos, A., Dalamaga, M., & Argyrakopoulou, G. (2023). Obesity Paradox: Fact or Fiction?. *Current Obesity Reports*, 12(2), 75–85. <https://doi.org/10.1007/s13679-023-00497-1>

Tanriover, C., Copur, S., Gaipov, A., Ozlusen, B., Akcan, R. E., Kuwabara, M., Hornum, M., Van Raalte, D. H., & Kanbay, M. (2023). Metabolically healthy obesity: Misleading phrase or healthy phenotype?. *European Journal of Internal Medicine*, 111, 5–20. <https://doi.org/10.1016/j.ejim.2023.02.025>

WHO Expert Consultation (2004). Appropriate body-mass index for Asian populations and its implications for policy and intervention strategies. *Lancet (London, England)*, 363(9403), 157–163. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(03\)15268-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(03)15268-3)

ISOFLAVONAS DE SOYA: ¿UNA NUEVA ESPERANZA PARA LAS MADRES EN LACTANCIA?

SOY ISOFLAVONES:
A NEW HOPE FOR BREASTFEEDING MOTHERS

Xquenda Ríos Aguilar (1)
Norma A. Caballero (2)*
Francisco J. Melendez (3)
María Eugenia Castro (4)

1. Estudiante de la Licenciatura en Biotecnología, Facultad de Ciencias Biológicas, BUAP
2. Facultad de Ciencias Biológicas, BUAP, 72570, México
3. Laboratorio de Química Teórica, Facultad de Ciencias Químicas, BUAP, 72570, Puebla, México
4. Centro de Química del Instituto de Ciencias, ICUAP, BUAP, 72570, Puebla, México (222) 2295500 ext. 2830 y 2819

Correos:
xquenda.riosaguilar@alumno.buap.mx
norma.caballero@correo.buap.mx*
francisco.melendez@correo.buap.mx
mareug.castro@correo.buap.mx

<https://orcid.org/0009-0007-3555-8062>
<https://orcid.org/0000-0002-9410-5852>
<https://orcid.org/0000-0002-5796-0649>
<https://orcid.org/0000-0003-1716-7707>

Folio: A11N77.25/993

Resumen

La leche materna proporciona nutrientes esenciales para el desarrollo del bebé y refuerza su sistema inmunológico. Sin embargo, algunas madres enfrentan dificultades debido a una producción insuficiente de leche, síndrome conocido como hipogalactia. Ante esta situación, ¿podría existir una alternativa natural para estimular la lactancia? La respuesta a esta interrogante podría encontrarse en plantas de uso común como la soya, que contiene una gran cantidad de isoflavonas, compuestos que han sido propuestos como moduladores de los receptores de estrógeno y dopamina, que son clave en la regulación de la producción de leche materna. Para explorar esta posibilidad, se emplearon herramientas de biología y química computacional para analizar la interacción de isoflavonas presentes en la soya (equol, daidzeína, genisteína y gliciteína) con estos receptores. Los resultados sugieren que el equol y la daidzeína muestran alta afinidad por el receptor de estrógeno, mientras que la genisteína y la gliciteína se destacan por su unión al receptor de dopamina.

Palabras clave: Lactancia materna, hipogalactia, soya, isoflavonas, receptor de estrógeno, receptor de dopamina, acoplamiento molecular, química computacional.

Abstract

Breast milk provides essential nutrients for the baby's development and strengthens their immune system. However, some mothers face difficulties due to insufficient milk production, a syndrome known as hypogalactia. Given this situation, could there be a natural alternative to stimulate lactation? The answer to this question could be found in commonly used plants like soy, which contains a large amount of isoflavones, compounds that have been proposed as modulators of estrogen and dopamine receptors, which are key in the regulation of breast milk production. To explore this possibility, tools from computational biology and chemistry were employed to analyze the interaction of isoflavones present in soy (equol, daidzein, genistein, and glycitein) with these receptors. The results suggest that equol and daidzein show high affinity for the estrogen receptor, while genistein and glycitein stand out for their binding to the dopamine receptor.

Keywords: Breastfeeding, hypogalactia, soy, isoflavones, estrogen receptor, dopamine receptor, molecular docking, computational chemistry

La lactancia y sus retos

La leche materna es el alimento ideal para los bebés durante sus primeros meses de vida. No solo les proporciona todos los nutrientes que necesitan, sino que también los factores de protección indispensables para su desarrollo y bienestar (Jebena & Tenagashaw, 2022). Por esta razón, la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda la lactancia materna exclusiva durante los primeros seis meses de vida del bebé. Esto significa que, durante ese periodo, el bebé únicamente puede ser alimentado con leche materna, ya sea directamente del seno de la madre, de una nodriza o mediante un biberón con leche extraída (OMS, 2008), seguida por una lactancia complementaria hasta los 24 meses de edad (OMS, 2018).

Sin embargo, en la actualidad, las madres se enfrentan a varios desafíos que dificultan seguir estas recomendaciones. Uno de los más comunes es la hipogalactia, un síndrome que se presenta cuando la madre no produce suficiente leche para satisfacer las necesidades alimenticias del bebé (Dutheil et al., 2021). Las causas de este síndrome pueden ser variadas, desde problemas físicos, como la insuficiencia de tejido glandular en los senos, hasta fac-

tores emocionales, como el estrés agudo, o situaciones prácticas como la reincorporación temprana al trabajo o escuela durante las primeras semanas después del parto (Dutheil et al., 2021; Kent et al., 2012; Ruth A. Lawrence, 2021).

A nivel global, el 50% de las mujeres optan por dejar de amamantar y recurrir a fórmulas lácteas, argumentando que no tienen suficiente leche (Dutheil et al., 2021). En México, la Encuesta Nacional de Salud y Nutrición (ENSANUT) respalda esta tendencia (Figura 1), mostrando que muchas madres optan por no amamantar debido a la baja o nula producción de leche materna.

Esta decisión, aunque comprensible, tiene consecuencias profundas. A nivel mundial, la falta de lactancia materna contribuye a miles de muertes materno-infantiles (Figura 2) debido a que los bebés pierden los beneficios únicos de la leche materna, como la protección contra enfermedades y un desarrollo óptimo. Por su parte, las madres también se ven afectadas, pues la lactancia materna reduce el riesgo de enfermedades como cáncer de mama y ovario (Walters et al., 2019a).

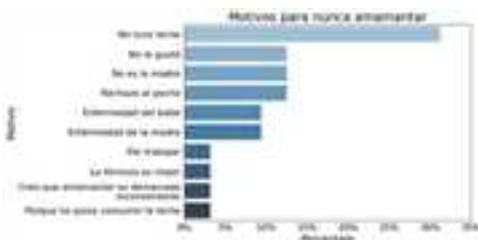


Figura 1. Motivos expresados por las madres para nunca amamantar (ENSANUT 2023). Elaboración propia.

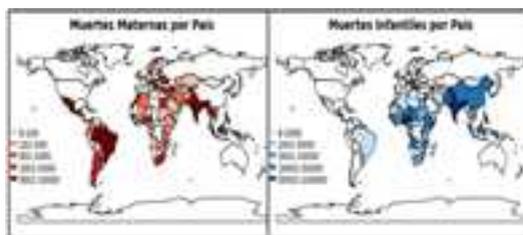


Figura 2. Mapa Mundial de muertes materno-infantiles (Walters et al., 2019b).

Estos datos no solo reflejan un problema de salud pública, sino que también subrayan la necesidad urgente de desarrollar tratamientos efectivos para la hipogalactia, una condición que, de ser abordada, podría transformar la lactancia materna a nivel global.

Pero, ¿qué hace que algunas mujeres produzcan poca leche? Para responder a esta pregunta, es necesario adentrarse en los mecanismos hormonales que regulan la producción de leche materna.

El estrógeno y la dopamina en la producción de leche

La producción de leche materna es un proceso fascinante que depende de un delicado equilibrio hormonal. Dos actores clave en este proceso son el estrógeno y la dopamina, hormonas que trabajan en conjunto para regular la lactancia.

El estrógeno juega un papel fundamental en el desarrollo del tejido mamario. Durante la pubertad, es esencial para el crecimiento de los conductos en las glándulas mamarias, colaborando con otras hormonas y factores de crecimiento, como la hormona del crecimiento (GH), el factor de crecimiento similar a la insulina 1 (IGF-1), el factor de crecimiento transformante beta (TGF-β) y el factor de crecimiento de los hepatocitos (HGF/SF). Juntos, estos elementos fomentan el desarrollo de los conductos por los que fluirá la leche (Figura 3) (Ruth A. Lawrence, 2021).

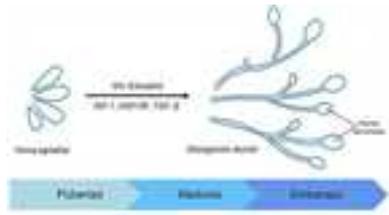


Figura 3. Esquema de la regulación de la elongación ductal en la mama durante la pubertad, la madurez y el embarazo (Ruth A. Lawrence, 2021).

Más adelante, durante el embarazo, esta hormona prepara los senos para la lactancia, estimulando el crecimiento de los conductos por los que fluirá la leche y potenciando la acción de la prolactina, la hormona responsable de la producción de leche (Rusidzé et al., 2021).

Sin embargo, la prolactina no actúa por sí sola. Su liberación está controlada por la dopamina, que actúa como su principal inhibidor. La dopamina frena la liberación de prolactina, manteniendo sus niveles bajo control. Pero cuando los niveles de dopamina disminuyen, la prolactina aumenta, estimulando la producción de leche (Figura 4). Este mecanismo explica por qué medicamentos como la domperidona y la metoclopramida, que bloquean la acción de la dopamina, han demostrado ser efectivos para aumentar la producción de leche en mujeres (Grzeskowiak et al., 2019).

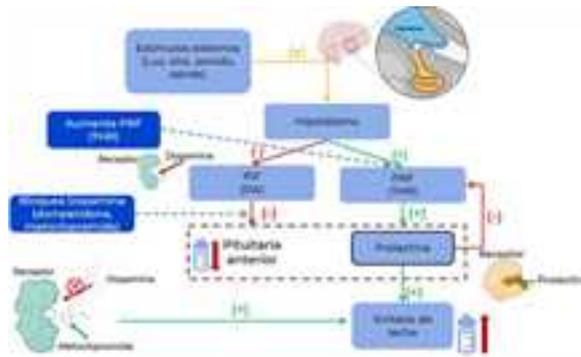


Figura 4. Regulación de la prolactina en la lactancia y mecanismo de acción de los galactagogos. THR, hormona liberadora de tirotrópina; PRF, factor liberador de prolactina; DA, dopamina; PIF, factor inhibidor de la prolactina. (Grzeskowiak et al., 2019).

Por tanto, mantener niveles adecuados de estrógeno y controlar la dopamina son factores claves para una lactancia exitosa. Sin embargo, los tratamientos actuales, no están exentos de efectos secundarios, lo que ha llevado a explorar alternativas naturales, como las isoflavonas de la soya, que podrían modular estos sistemas hormonales de manera más segura y efectiva.

La soya (*Glycine max*) es una leguminosa originaria de Asia que se ha convertido en uno de los cultivos más importantes a nivel mundial por su versatilidad en la alimentación y múltiples beneficios a la salud (Hu et al., 2020; Rizzo et al., 2022).

¿Qué hace tan especial a la soya?

Esta planta, conocida por sus vainas y semillas (Figura 5) tiene un alto contenido de isoflavonas, compuestos pertenecientes a la familia de los flavonoides. Entre las isoflavonas se destacan la genisteína, la daidzeína y la gliciteína estas dos últimas representan el 30 y 60 % de las isoflavonas presentes en la soya, respectivamente (Jung et al., 2020).



Figura 5. Planta de soya. En los acercamientos se destacan: vainas verdes en crecimiento (izquierda), vainas maduras y secas listas para la cosecha (arriba derecha) y semillas de soya ya extraídas (abajo derecha).

Las isoflavonas actúan como moduladores selectivos de los receptores de estrógeno, regulando su actividad (Hu et al., 2020). Esta propiedad no solo las convierte en un objeto de estudio fascinante, sino que también abre la puerta a investigar sus posibles interacciones con otros sistemas hormonales, como el de la dopamina.

Sin embargo, para aprovechar al máximo estas propiedades, es necesario entender cómo interactúan estas moléculas con los receptores. Aquí es donde entran en juego las herramientas computacionales, que permiten simular y predecir estas interacciones de manera precisa y eficiente.

Laboratorio virtual: Química y biología computacional

La química computacional funciona como un laboratorio virtual, donde, en lugar de tubos de ensayo y matraces, se usan computadoras para estudiar cómo se comportan las moléculas. Gracias a programas como Gaussian19 y GaussView, es posible estudiar su estructura y predecir sus propiedades, todo sin salir de la pantalla (Dennington et al., 2019; Frisch et al., 2016). Estos programas no solo ayudan a descifrar cómo funcionan las moléculas, sino que también son esenciales para el diseño de nuevos fármacos.

Una de las técnicas más importantes en este campo es el acoplamiento molecular (molecular docking). Esta técnica predice cómo una molécula pequeña llamada ligando se une a un receptor, determinando la posición y orientación del ligando en el receptor, y también evalúa qué tan estable es esa unión mediante una función de puntuación. Además de estudiar interacciones entre proteínas y ligandos, hoy en día también se exploran interacciones entre proteínas e incluso con ácidos nucleicos (Stanzione et al., 2021).

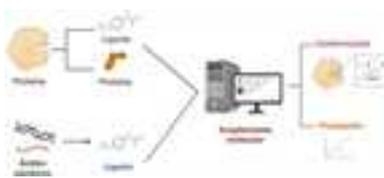


Figura 6. Esquema del proceso de acoplamiento molecular (molecular docking) Creado con Biorender (<https://www.biorender.com>).

Pero ¿cómo se preparan estas moléculas para el acoplamiento? Aquí es donde entran en juego las bases de datos. Las moléculas pequeñas, como las isoflavonas de la soya, se consultan en bases de datos como The Cambridge Crystallographic Data Centre (CCDC, <https://www.ccdc.cam.ac.uk>) y PubChem (<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov>). Estas plataformas contienen información detallada sobre la estructura de miles de moléculas. Por ejemplo, en este estudio se encontraron estructuras cristalizadas de tres isoflavonas: daidzeína, equol y genisteína. Al no tener una estructura cristalizada disponible de la gliciteína, se modeló a partir de datos disponibles en PubChem.

Una vez obtenidas las estructuras, se optimizaron en el programa Gaussian16, que optimiza la geometría de las moléculas para asegurar que estén en su estructura más estable (Figura 7). Se realizaron los cálculos de estructura electrónica basados en la teoría del funcional de la densidad (DFT), utilizando el funcional híbrido B3LYP (Becke, 1993; Domingo et al., 2016) y un conjunto de funciones de base 6-31+G(d) (Petersson et al., 1988). Este paso es crucial para garantizar que las moléculas tienen la estructura adecuada, correspondiente a un mínimo de energía, para interactuar con los receptores en el acoplamiento molecular.

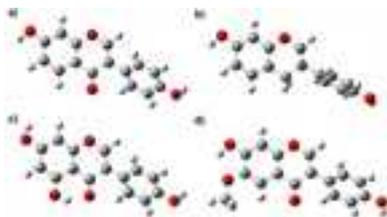


Figura 7. Estructuras optimizadas de las isoflavonas, a) daidzeína, b) equol, c) genisteína y d) gliciteína.

Para estudiar cómo las isoflavonas podrían unirse a los receptores de estrógeno y dopamina, primero fue necesario contar con las estructuras tridimensionales de estos receptores. Para ello, se recurrió a la base de datos Protein Data Bank (PDB, <https://www.rcsb.org>), que contiene estructuras tridimensionales de proteínas obtenidas experimentalmente,

generalmente a través de la técnica de rayos X. De esta base de datos se eligieron las estructuras con los códigos PDB: 1ERE (receptor de estrógeno) y 6CM4 (receptor de dopamina) (Figura 8). Estas estructuras fueron seleccionadas porque muestran claramente el sitio de unión, lo que permite simular de forma más precisa cómo podrían interactuar las isoflavonas con cada receptor.

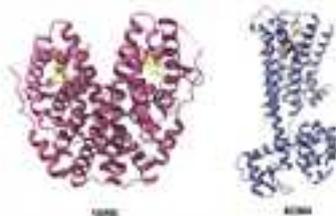


Figura 8. Receptor de estrógeno y de dopamina. Del lado izquierdo se muestra en rosa la estructura molecular del receptor de estrógeno- α (PDB ID: 1ERE) en complejo con la molécula de estradiol en color amarillo. Del lado derecho, se presenta la estructura molecular del receptor de dopamina D2 (PDB ID: 6CM4) en complejo con la molécula de risperidona en color naranja.

Se realizó un acoplamiento molecular para predecir si las isoflavonas de soya pueden unirse de forma estable a los receptores de estrógeno y dopamina, lo cual es clave para entender su posible efecto sobre la producción de leche. Se utilizaron diferentes programas según las características de cada receptor: AutoDock 4 (Morris et al., 2009) para el receptor de estrógeno y AutoDock Vina (Trott & Olson, 2010) para el receptor de dopamina, y GOLD (Verdonk et al., 2003) para ambos, con el fin de comparar resultados y aumentar la precisión del análisis. Estos programas permitieron simular los sitios de unión y conocer qué tan fuerte y en qué zona del receptor se daría la interacción.

Las isoflavonas y sus interacciones

El acoplamiento molecular permitió predecir qué tan fuerte podrían unirse las isoflavonas a los dos receptores, midiendo su energía de unión en kcal/mol: a menor valor (más negativo), mayor afinidad por el receptor. En el caso del receptor de estrógeno, el equol obtuvo la mejor energía con -8.08 kcal/mol, formando puentes de hidró-

geno con ácido glutámico 353, glicina 521 y arginina 394 en el sitio activo (la región donde normalmente se une el estrógeno natural). La daidzeína, con una afinidad también alta de -7.8 kcal/mol, interactuó con los mismos aminoácidos, excepto por la arginina 394, que fue reemplazada por histidina 524 (Figura 9). Que ambas isoflavonas se unan al sitio activo es importante, porque esta región regula directamente la función del receptor.

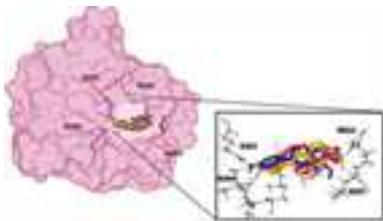


Figura 9. Cavidad del receptor estrógeno. En la cavidad se encuentran los aminoácidos arginina 394, glicina 521, histidina 524, ácido glutámico 353. Se representan los cinco ligandos de la siguiente manera: el estradiol (rosa), daidzeína (naranja), equol (amarillo), genisteína (verde) y gliciteína (azul). Las líneas en verde muestran las interacciones por puente de hidrógeno con los aminoácidos del bolsillo de unión.

Por otro lado, para el receptor de dopamina, la genisteína y la gliciteína fueron las que presentaron la mejor energía con

-9.3 kcal/mol, para todas las isoflavonas. Estas isoflavonas compartieron también interacciones de puente de hidrógeno con los aminoácidos asparagina 114 y serina 197 (Figura 10). El hecho de que ambas isoflavonas se acomoden en el sitio activo es clave, ya que esta región controla la activación del receptor.

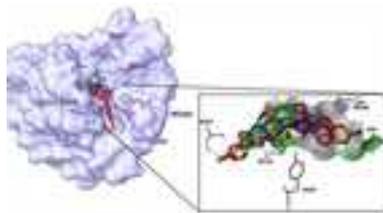


Figura 10. Cavidad del receptor D2 de dopamina. En la cavidad se encuentra los aminoácidos Asparagina 114, Triptófano 100, Serina 197. Los cinco ligandos, risperidona (rosa), daidzeína (naranja), equol (amarillo), genisteína (verde) y gliciteína (azul).

En ambos casos, las isoflavonas mostraron una variedad de interacciones relevantes con los receptores, como puentes de hidrógeno y fuerzas de van der Waals, lo que sugiere que estos compuestos podrían modular eficazmente la actividad de ambos receptores.

Conclusiones y perspectivas

Los estudios computacionales de las isoflavonas presentes en la soya revelan información valiosa sobre su potencial terapéutico como moduladores de los receptores de estrógeno y dopamina. Gracias a sus características estructurales, estas moléculas podrían desempeñar un papel clave en el desarrollo de nuevas terapias para el tratamiento de la hipogalactia.

La combinación de estudios computacionales y programas avanzados como AutoDock y GOLD abre nuevas posibilidades para el diseño de terapias basadas en compuestos naturales, como las isoflavonas de la soya, que podrían revolucionar

el tratamiento de la hipogalactia y otros desafíos en la lactancia materna.

Sin embargo, estos resultados deben ser validados mediante investigaciones futuras, tanto computacionales como experimentales. Es crucial profundizar en estudios complementarios que permitan confirmar y refinar las interacciones predichas, así como llevar a cabo pruebas de laboratorio que garanticen su seguridad y eficacia de estos compuestos. Y así explorar la aplicabilidad clínica de estos compuestos naturales, es decir, cómo podrían utilizarse en tratamientos reales para mejorar la producción de leche materna.

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.

Conflicto de interés

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

Agradecimientos

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

- Becke, A. D. (1993). Density-functional thermochemistry. III. The role of exact exchange. *The Journal of Chemical Physics*, 98(7), 5648–5652. <https://doi.org/10.1063/1.464913>
- Dennington, R., Keith, T. A., & Millam, J. M. (2019). *Gaussian View Version 6*.
- Domingo, L., Ríos-Gutiérrez, M., & Pérez, P. (2016). Applications of the Conceptual Density Functional Theory Indices to Organic Chemistry Reactivity. *Molecules*, 21(6), 748. <https://doi.org/10.3390/molecules21060748>
- Dutheil, F., Méchin, G., Vorilhon, P., Benson, A. C., Bottet, A., Clinchamps, M., Barasinski, C., & Navel, V. (2021). Breastfeeding after Returning to Work: A Systematic Review and Meta-Analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(16), 8631. <https://doi.org/10.3390/ijerph18168631>
- Frisch, M. J., Trucks, G. W., Schlegel, H. B., Scuseria G E and Robb, M. A., Cheeseman, J. R., Scalmani, G., Barone, V., Petersson, G. A., Nakatsuji, H., Li, X., Caricato, M., Marenich, A. V, Bloino, J., Janesko, B. G., Gomperts, R., Mennucci, B., Hratchian, H. P., Ortiz, J. V, Izmaylov A F and Sonnenberg, J. L., ... Fox, D. J. (2016). *Gaussian 16 Rev. C.01*.
- Grzeskowiak, L. E., Wlodek, M. E., & Geddes, D. T. (2019). What Evidence Do We Have for Pharmaceutical Galactagogues in the Treatment of Lactation Insufficiency?—A Narrative Review. *Nutrients*, 11(5), 974. <https://doi.org/10.3390/nu11050974>
- Hu, C., Wong, W.-T., Wu, R., & Lai, W.-F. (2020). Biochemistry and use of soybean isoflavones in functional food development. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(12), 2098–2112. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1630598>
- Jebena, D. D., & Tenagashaw, M. W. (2022). Breastfeeding practice and factors associated with exclusive breastfeeding among mothers in Horro District, Ethiopia: A community-based cross-sectional study. *PLOS ONE*, 17(4), e0267269. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0267269>

- Jung, Y. S., Rha, C.-S., Baik, M.-Y., Baek, N.-I., & Kim, D.-O. (2020). A brief history and spectroscopic analysis of soy isoflavones. *Food Science and Biotechnology*, 29(12), 1605–1617. <https://doi.org/10.1007/s10068-020-00815-6>
- Kent, J. C., Prime, D. K., & Garbin, C. P. (2012). Principles for Maintaining or Increasing Breast Milk Production. *Journal of Obstetric, Gynecologic & Neonatal Nursing*, 41(1), 114–121. <https://doi.org/10.1111/j.1552-6909.2011.01313.x>
- 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>
- Organización Mundial de la Salud. (2008). Indicators for assessing infant and young child feeding practices Part 1 Definitions.
- Organización Mundial de la Salud. (2018). Guideline: counselling of women to improve breastfeeding practices. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241550468>
- Petersson, G. A., Bennett, A., Tensfeldt, T. G., Al-Laham, M. A., Shirley, W. A., & Mantzaris, J. (1988). A complete basis set model chemistry. I. The total energies of closed-shell atoms and hydrides of the first-row elements. *The Journal of Chemical Physics*, 89(4), 2193–2218. <https://doi.org/10.1063/1.455064>
- Rizzo, G., Feraco, A., Storz, M. A., & Lombardo, M. (2022). The role of soy and soy isoflavones on women's fertility and related outcomes: an update. *Journal of Nutritional Science*, 11, e17. <https://doi.org/10.1017/jns.2022.15>
- Rusidzé, M., Adlanmérini, M., Chantalat, E., Raymond-Letron, I., Cayre, S., Arnal, J.-F., Deugnier, M.-A., & Lenfant, F. (2021). Estrogen receptor- α signaling in post-natal mammary development and breast cancers. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 78(15), 5681–5705. <https://doi.org/10.1007/s00018-021-03860-4>

- Ruth A. Lawrence, R. M. L. (2021). Breastfeeding A Guide for the Medical Profession (9th ed.).
- Stanzione, F., Giangreco, I., & Cole, J. C. (2021). Use of molecular docking computational tools in drug discovery (pp. 273–343). <https://doi.org/10.1016/bs.pmch.2021.01.004>
- Trott, O., & Olson, A. J. (2010). AutoDock Vina: Improving the speed and accuracy of docking with a new scoring function, efficient optimization, and multithreading. *Journal of Computational Chemistry*, 31(2), 455–461. <https://doi.org/10.1002/jcc.21334>
- Verdonk, M. L., Cole, J. C., Hartshorn, M. J., Murray, C. W., & Taylor, R. D. (2003). Improved protein–ligand docking using GOLD. *Proteins: Structure, Function, and Bioinformatics*, 52(4), 609–623. <https://doi.org/10.1002/prot.10465>
- Walters, D. D., Phan, L. T. H., & Mathisen, R. (2019b). The cost of not breastfeeding: global results from a new tool. *Health Policy and Planning*, 34(6), 407–417. <https://doi.org/10.1093/heapol/czz050>

REPERCUSIONES DE LA DIETA SOBRE LA MICROBIOTA INTESTINAL Y SU RELACIÓN CON EFECTOS EN LA SALUD PARTE 2.

REPERCUSSIONS OF THE DIET ON THE INTESTINAL
MICROBIOTA AND ITS RELATIONSHIP WITH EFFECTS ON
HEALTH, PART 2

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.nl538@gmail.com*
rolandogarciagomez@quimica.unam.mx
mcduran@quimica.unam.mx

<https://orcid.org/0009-0008-8074-8225>
<https://orcid.org/0000-0002-4135-9605>
<https://orcid.org/0000-0001-9509-908X>

Folio A11N98.25/1014

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 nutricionales 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

Como se vio en la primera parte, la microbiota intestinal es el conjunto de microorganismos (levaduras, virus y algunas arqueas) que coexisten en el intestino con el anfitrión u hospedero (Korpela, 2018). Estos microorganismos coadyuvan en una simbiosis a la síntesis de vitaminas, a la protección contra microorganismos patógenos y a la mejora del funcionamiento del sistema inmune (Gual-Grau, 2019).

Se mencionó también la importancia de estudiar en un modelo animal los efectos sobre la microbiota intestinal de la dieta suministrada tomado en cuenta ahora a los aditivos alimentarios y los cambios que pudieran causar en ella de eubiosis y disbiosis, así como algunas enfermedades que aparecen en el hospedero o anfitrión por algunas de estas sustancias químicas.

Los aditivos alimentarios son sustancias químicas muy importantes para la industria alimentaria y se encuentran presentes en prácticamente todos los productos comercializados. Diversas investigaciones consideran que pueden afectar a la microbiota intestinal por su consumo. Como ejemplo, varios autores señalan que el consumo de edulcorantes hipocalóricos o no nutritivos tiene efectos en distintos filos o especies bacterianas (Anderson y Kirkland, 1980; Bian et al., 2017a; Bian et al., 2017b; Cao et al., 2020; Palmnäs et al., 2014).

Este es el objetivo de esta segunda parte: Evaluar los efectos en animales modelo, la rata Wistar principalmente, por el consumo de aditivos alimentarios especialmente las posibles repercusiones en la salud del hospedero o anfitrión generadas por su presencia en la dieta.

Como se mencionó en la primera parte, 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. Y, considerando las características de confinamiento oca-

sionadas por el COVID-19, no se planteó la obtención de datos experimentales de ningún tipo. Esto es, el trabajo realizado fue de tipo documental. El procedimiento de ejecución fue el siguiente: Una vez que fueron encontrados los artículos de interés, se procedió a realizar su lectura, interpretación, análisis, abstracción y discernimiento de cada uno. Con ello, el enfoque que se buscó en esta segunda parte de los tres artículos se encontró relacionado con los siguientes incisos:

- a) El estudio de la relación de la microbiota intestinal con los aditivos alimentarios ingeridos con los alimentos que los contienen especialmente en ratas hembra y macho
- b) El desarrollo de enfermedades por la ingestión de algunos aditivos alimentarios que impacten a la microbiota intestinal de manera negativa
- c) El impacto de la microbiota intestinal en la presencia de algunas enfermedades

Hallazgos y discusión

Como se mencionó en la introducción de la primera parte, los aditivos alimentarios han sido de gran interés para la industria alimentaria debido a las amplias aplicaciones que se les pueden dar para conservar los alimentos y bebidas e impartirles características deseables especialmente organolépticas más que nutricias. La investigación científica en torno a ellos ha sido de crucial importancia para demostrar su inocuidad, sobre todo, en aquellos aditivos que de manera directa o indirecta pueden causar afectaciones en la microbiota intestinal. De esta manera, su consumo puede repercutir en la salud de los consumidores por los cambios fisiológicos, metabólicos o nutricionales provocados en ambos, la microbiota y el consumidor(a) mismos. En muchas ocasiones este consumo puede provocar una disbiosis (desequilibrio entre la microbiota intestinal que afecta la salud en diversas formas). Algunos probióticos y prebióticos específicos pueden otorgar al individuo una mejora o un sostenimiento de su eubiosis (equilibrio benéfico entre

la microbiota intestinal y la salud del hospedero o anfitrión).

A continuación, se describe de forma sucinta lo encontrado en la literatura relacionado con alteraciones causadas en la microbiota por el consumo de diversos aditivos. Para referencia de las y los lectores(as) en la primera parte de esta serie de tres artículos se puso en forma gráfica lo que es esperado de la composición de la microbiota a lo largo de la vida humana (Delgado-Palacio, 2005, tomada de Mitsuoka, 1992, publicada en México por Durán-de-Bazúa, 2017). En esa figura se grafican las etapas de la vida humana: Nacimiento, destete, madurez y vejez versus \log_{10} recuentos/g heces y las especies más abundantes son Bacteroides, Eubacterium, Peptostreptococcus, Bifidobacterium, Escherichia coli, Enterococcus, Lactobacillus, Clostridium perfringens, en orden descendente para la madurez y fluctuante para las otras etapas.

Acesulfame de potasio: Edulcorante artificial usado ampliamente en bebidas y alimentos. Se ha demostrado en ratones macho que su consumo aumenta la cantidad de Bacteroides, Firmicutes, Sutterella y Anaerostipes. En contraste, en ratas hembras el consumo de acesulfame de K (15 mg/kg masa corporal m.c. día) provocó una baja cantidad de Oxalobacteraceae, Clostridium, Lactobacillus y Ruminococcaceae (Bian et al., 2017a; Cao et al., 2020).

Aspartame: Edulcorante artificial usado ampliamente en bebidas y alimentos solo o conjuntamente con el acesulfame de potasio. El consumo diario de aspartame (40 mg/kg. m.c.) en ratas macho durante 8 semanas demostró aumentos de Firmicutes y Clostridium cluster, así como una disminución en la cantidad de Bacteroides y Prevotella (Cao et al., 2020; Palmnäs et al., 2014).

Sacarina: Edulcorante artificial usado ampliamente en bebidas y alimentos así como en los dentríficos. En ratas macho que consumieron sacarina (5 mg/kg m.c.) durante 10 días aumentaron la cantidad de bacterias aerobias en el ciego. No obstante, no existieron cambios en la cantidad de bacterias anaerobias (Anderson y Kirkland, 1980; Cao et al., 2020). En ratones, el consumo de sacarina (0.3 mg/

mL en agua de consumo normal) durante periodos de tres y seis meses mostró cambios drásticos en la microbiota intestinal. Concretamente las proporciones de Roseburia, Sporosarcina, Jeotgalicoccus, Akkermansia, Oscillospira y Corynebacterium aumentaron significativamente. Por su parte, Anaerostipes, Ruminococcus, Adlercreutzia y Dorea mostraron una disminución, confirmando lo mencionado por Suez et al. (2014) sobre las afectaciones a la microbiota con el consumo de sacarina (Bian et al., 2017b).

Sucralosa: En ratas macho que consumieron sucralosa (15 mg/kg m.c.) disminuyeron la cantidad de los géneros de Lactobacillus, Bifidobacterium, Bacteroides y Clostridia (Abou-Donia et al., 2008; Cao et al., 2020).

Proantocianidinas: Otro tipo de aditivos son las proantocianidinas (antioxidantes). Se ha reportado que el consumo de estas proantocianidinas causan efectos negativos sobre los siguientes Phyla: Disminución de Firmicutes, con un aumento de Bacteroidetes y Proteobacterias. Asimismo, existe un aumento en las familias de las bacterias Bacteroidaceae, Porphyromonadaceae, Alcaligenaceae y Veillonellaceae, con una disminución de Ruminococcaceae y Dehalobacteriaceae. Además, aumentaron los géneros Bacteroides, Parabacteroides sutterella, Phascolarctobacterium, Bifidobacterium. No obstante, se reporta la disminución de Ruminococcus después del consumo durante 8 días de extracto de proantocianidinas de uva (500 mg/ kg m.c.) (Casanova-Martí et al., 2017; Čoklo et al., 2020).

Compuestos fenólicos (antioxidantes): Ratas que consumieron constantemente compuestos fenólicos mostraron un aumento del género Bifidobacterium. En contraste, ese consumo durante 14 meses de compuestos fenólicos (2.5, 5, 10 y 20 mg/ kg. m.c.) eliminó el crecimiento de la especie Clostridium sensu stricto (Chacar et al., 2018; Čoklo et al., 2020).

Fructanas (prebióticos): En ratas el consumo de fructanas durante 4 semanas aumentó la cantidad presente de Lactobacillus spp. en heces fecales (Čoklo et al., 2020; Jasso-Padilla et al., 2017). Los dos autores y la autora Lhacen un comentario

al respecto de las sustancias químicas conocidas coloquialmente como gomas: Por convención, usan la terminación -ana. Por razones ingnotas muchos autores al traducir el nombre del inglés usan el género masculino en vez del femenino de gomas. En esta serie de tres artículos cuando se mencionan gomas se escriben en femenino, como el caso de las fructanas o la dextrana o la quitosana o la carragenina, por poner estos ejemplos.

Pectinas (gelificante): En ratas que consumieron extracto de prebióticos de *Agave salmiana* en conjunto con una dieta

normal durante 12 semanas aumentaron las proporciones del filo de los Firmicutes, especies de *Lactobacillus* y *Lachnospiraceae*. Asimismo, se encontró una disminución del filo de los Bacteroidetes y de especies del género *Akkermansia* (Čoklo et al., 2020; Jasso-Padilla et al., 2017).

Como se aprecia, el consumo de diversos aditivos genera cambios en las abundancias relativas de diversos, filos, géneros y especies bacterianas. Por lo tanto, pueden existir repercusiones en la salud derivadas de la alteración de la microbiota, ya sea para bien o para mal.

Evaluación de las repercusiones a nivel: Fisiológico, metabólico y nutricional sobre el consumo de aditivos alimentarios

Existen en la actualidad una gama enorme de aditivos alimentarios utilizados para conservar, teñir o mejorar algunos atributos de los alimentos según los fabricantes. El uso desmedido de aditivos alimentarios es el resultado y consecuencia de la industrialización y desarrollo tecnológico de diversos productos de consumo. Un aditivo es aprobado para el consumo humano después de realizarle diversos estudios sobre su toxicidad aguda, subaguda y crónica (Moutinho et al., 2007). Sin embargo, la vigilancia constante de sus efectos post-comercialización debería continuar durante largos periodos de tiempo. Asimismo, deberían analizarse los efectos de las distintas combinaciones de aditivos en las diversas matrices alimentarias (Durán-de-Bazúa, 2017).

Los efectos provocados por la ingesta de un aditivo en un organismo no solamente depende de su dosis, sino también de la edad, el sexo, el estado nutricional, los factores genéticos del individuo, entre otros. También dependen del periodo de exposición y una serie de variables casi interminables. En ocasiones la toxicidad no radica en el compuesto químico usado como un aditivo, sino de los metabolitos producidos después de su consumo e, incluso, pueden tener repercusiones sutiles como la diferencia mínima en la excreción o absorción de una sustancia totalmente ajena a dicho aditivo (Moutinho et al., 2007).

A continuación, se presentan estudios donde se encontraron repercusiones fisiológicas y/o metabólicas debidas al consumo de diversos aditivos alimentarios.

Colorantes

Tartrazina. Aboel-Zahab et al. (1997) describieron un aumento de eosinófilos (tipo específico de células del sistema inmune perteneciente a los granulocitos del sistema mielode que contiene gránulos con enzimas para desnaturalizar proteínas de organismos patógenos) en la sangre tras el consumo de tartrazina (Figura 1) durante 30 y 60 días. Esta respuesta es similar a la observada cuando el sistema inmune intenta combatir una infección.

CyTEP, fue posible llevarla a cabo nuevamente en las instalaciones de la Facultad de Ciencias Químicas. Ahora con más experiencia y menos contratiempos, fuimos también orgullosos acreedores de dos medallas de bronce nacionales en casa (Figura 6).

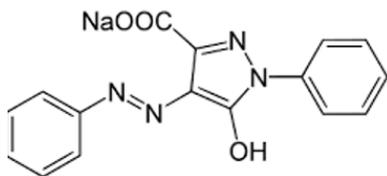


Figura 1. Estructura química de la tartrazina (Restrepo-Gallego, 2007)

En el estudio de Moutinho et al. (2007), realizado con ratas Wistar, se observó la producción de grandes cantidades de ácido sulfanílico. Este compuesto es producido por la microbiota intestinal. Además, los autores reportaron un aumento de varias células del sistema inmune. Este incremento de células del sistema inmune es similar al aumento observado durante el combate a una infección o la presencia de una alergia. Asimismo se observó la presencia de células granulares en el estómago. En humanos la presencia de células granulares en el estómago se asocia con el desarrollo de tumores gastrointestinales.

Eritrosina: El consumo de este aditivo durante 7 días (Figura 2) en dosis de 20 y 40 mg/kg m.c. provocó un aumento significativo de los niveles séricos de glucosa y colesterol en ratas macho de la estirpe Wistar (Wopara et al., 2019).

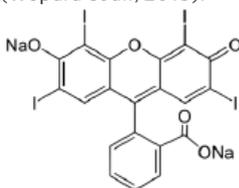


Figura 2. Estructura química de la eritrosina (Anónimo, 2019a)

Curcumina: Este colorante existe en un equilibrio tautomérico en su forma ceto y enol (Figura 3). La curcumina fue suministrada a 2 generaciones de ratas de la estirpe Wistar. El consumo de este aditivo no provocó cambios en la producción de tumores, ni aumentos de masa corporal ni cambios potenciales en la reproducción (Ganiger et al., 2006).

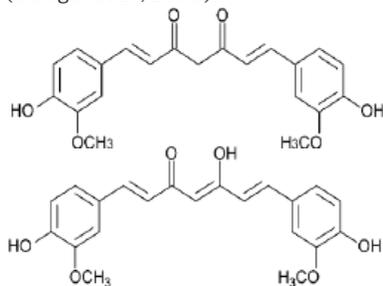


Figura 3. Estructuras químicas de la curcumina en sus formas ceto y enol, respectivamente (Anónimo, 2021a)

Dióxido de titanio (TiO₂): El dióxido de titanio es considerado por la Organización Mundial de la Salud, OMS, como uno de los colorantes alimentarios más seguros con un LD50 en ratas de 12,000 mg/kg m.c. Sin embargo, estudios recientes, del Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (IARC por sus siglas en inglés) han señalado a las nanopartículas (partículas que son más pequeñas que 100 nanómetros y estos son una millonésima parte de un metro) de dióxido de titanio como un posible agente carcinogénico en humanos. Un estudio realizado en ratas macho adultas de la estirpe Wistar demostró la existencia de efectos secundarios adversos en el consumo de nano-partículas de dióxido de titanio. Entre los efectos adversos se reportó toxicidad en riñones e hígado de ratas tras una administración de TiO₂ a dosis de 50 y 100 mg/kg m.c. Por lo tanto, se concluyó que tendrían que realizarse mayores estudios en la exposición humana a este colorante (Vasantharaja et al., 2014).

Potenciadores de sabor

Monoglutamato de sodio. Este potenciador de sabor (Figura 4) es un aditivo de libre adquisición el cual, en algunas ocasiones, llega a ser utilizado en exceso en comidas orientales o muy condimentadas. El consumo excesivo en ratas de la estirpe Wistar a dosis altas (de 3 a 6 gramos por día) ha ocasionado daños a nivel tisular en riñones, daños irreparables en la composición de la estructura del riñón, así como una disminución de conteo de corpúsculos renales. Lo anterior provocó en las ratas de experimentación una necrosis celular e insuficiencia renal (Eweka y Om'Iniabohs, 2008). Para el caso del hígado, se ha encontrado que el consumo de altas dosis de este potenciador puede afectar la función hematopoyética del hígado (disminución en la producción de glóbulos rojos y blancos producidos por el hígado). Por ello, se debe reconsiderar la toxicidad del monoglutamato de sodio, porque puede incluso provocar necrosis hepática (Eweka et al., 2011).

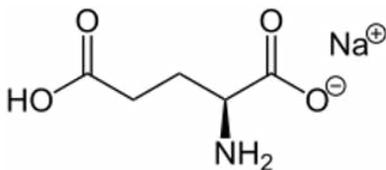


Figura 5. Estructura química del sulfito de sodio anhidro (Anónimo, 2022b)

Conservadores

Sulfito de sodio. Es un compuesto de azufre, como se aprecia en la Figura 5, capaz de liberar dióxido de azufre (SO₂). El SO₂ es el componente que ayuda a conservar los alimentos actuando como antioxidante y previniendo oscurecimientos. El dióxido de azufre existe de manera natural en productos fermentados como la cerveza o el vino y generalmente son producidos por levaduras. En un estudio realizado con ratas Wistar se concluyó que dicho aditivo no representaba ningún riesgo para salud, al no mostrar repercusiones, con la excepción de los individuos que carecen de la enzima sulfito oxidasa, necesaria para su degradación (García-Fuentes et al., 2015). Esto haría necesario adicionar una leyenda de advertencia en las etiquetas para las personas que tengan este problema metabólico.

Por otra parte, Ciardi et al. (2012) demostraron que el sulfito de sodio provoca una disminución de la liberación de leptina y un incremento en la secreción de IL-6. Estos cambios se asociaron a tener obesidad por hiperfagia y a presentar inflamación similar a la causada por una infección. Este estudio se realizó en cultivos in-vitro de adipocitos.

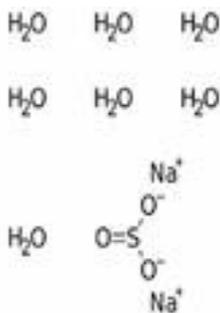


Figura 5. Estructura química del sulfito de sodio anhidro (Anónimo, 2022b)

Benzoato de sodio: Este conservador (Figura 6) afectó la liberación de leptina en cultivos in-vitro de adipocitos (el porcentaje de disminución dependió de la dosis agregada del conservador) (Ciardi et al., 2012). Del mismo modo, Brial et al. (2021) demostraron que la administración crónica de este conservador en la dieta produce efectos adversos sobre la tolerancia a la glucosa y aumentan la generación de adiposidad en ratones sanos. Asimismo, los ratones que consumieron el benzoato de sodio mostraron inflamación hepática (Brial et al., 2021).

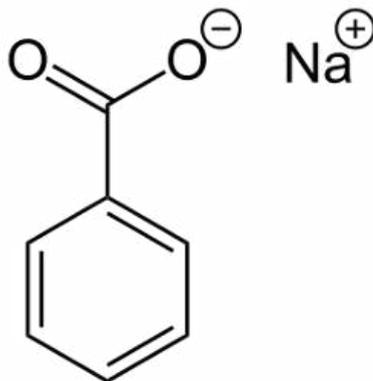


Figura 6. Estructura química del benzoato de sodio (Anónimo, 2021b)

Edulcorantes artificiales

Acesulfame de potasio/Sucralosa. Esta combinación de 2 edulcorantes (mostrados en las Figuras 7 y 8), al ser suministrados en agua endulzada a ratas Wistar demostraron tener repercusiones en la disminución de la función vascular dependiente del endotelio. Esto demuestra la existencia de un estrés hiper glucémico agudo provocado por bebidas endulzadas con edulcorantes artificiales. Del mismo modo, lo anterior confirma el hecho de que los edulcorantes artificiales pueden aumentar el riesgo de padecer disfunción vascular. Asimismo, el consumo de esta mezcla puede provocar desequilibrios de la homeostasis corporal por el cambio de distribución del tejido adiposo. Lo anterior, señala que podría aumentar el riesgo cardiometabólico. No obstante, deben realizarse futuros estudios para corroborar esta hipótesis (Risdon et al., 2020).

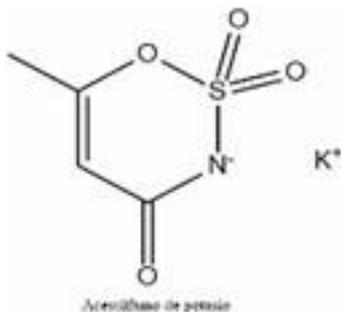


Figura 7. Estructura química del acesulfame de potasio (Anónimo, 2019b)

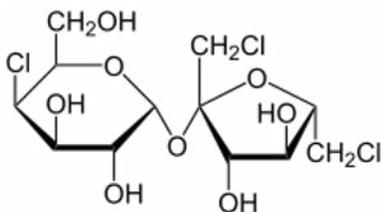


Figura 8. Estructura química de la sucralosa (Anónimo, 2022c)

Acesulfame de potasio: Complementando lo señalado párrafos arriba, los ratones estirpe CD-1 presentan alteraciones metabólicas y fisiológicas al consumir acesulfame de potasio (Figura 7) en dosis diarias de 37.5 mg/kg m.c. Los ratones macho aumentaron significativamente de masa corporal. En contraste las hembras no tuvieron incrementos significativos de masa. La abundancia relativa de genes implicados en la absorción o transporte de carbohidratos se vieron reducidos significativamente. En contraste, muchos genes implicados en el metabolismo de lipopoliglicúridos aumentaron como consecuencia del desequilibrio en la microbiota intestinal y el síndrome metabólico (Bian et al., 2017a).

Sacarina: Adicional a lo presentado al inicio de este documento, estudios realizados en ratas Wistar utilizando yogur endulzado con y sin sacarina (Figura 9) concluyeron que el consumo de sacarina provocó un aumento de masa corporal. Lo anterior, a pesar de no aumentar la ingesta calórica ni promover la resistencia a la insulina, posiblemente mediante una mayor absorción de glucosa en el intestino (Carraro-Foletto et al., 2016). Suez et

al. (2014) mencionan que el consumo de sacarina en ratones y humanos aumenta el riesgo de intolerancia a la glucosa. Además, el consumo de este edulcorante hipocalórico aumenta las probabilidades de presentar diabetes mellitus u obesidad. Los cambios metabólicos ocasionados por el consumo de este edulcorante son la alteración del metabolismo de esfingolípidos y lipopoliglicúridos. Bian et al. (2017b) estudiaron los efectos de la sacarina empleando ratones. A estos ratones se les dio de beber agua potable endulzada con sacarina, en una dosis equivalente a la ingesta diaria admisible en humanos. Los resultados de su estudio encontraron 2 genes característicos de la inflamación crónica sobre-expresados después del consumo. Estos genes fueron los codificantes para la enzima óxido nítrico sintasa y el factor de necrosis tumoral alfa. La expresión elevada de estos genes sugiere que los ratones que consumieron sacarina presentaron una inflamación del hígado, así como alteraciones en las funciones metabólicas de este órgano (Bian et al., 2017b).

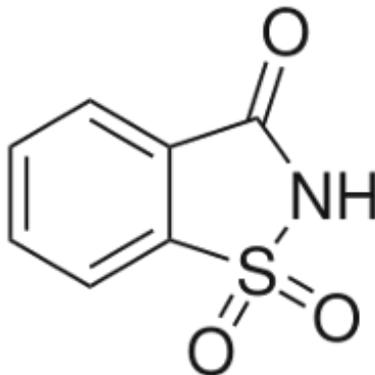


Figura 9. Estructura química de la sacarina (Anónimo, 2022d)

Aspartame. También ya presentado antes, el consumo de aspartame (Figura 10) ha presentado diversas repercusiones en órganos de ratas de la estirpe Wistar. Kumar-Choudhary y Sheela-Devi, (2014) encontraron un aumento de radicales libres (moléculas inestables formadas durante el metabolismo normal de las células por medio de cambios químicos que ocurren en una célula). Los radicales libres se pueden acumular en las células y dañar otras moléculas. El daño puede

aumentar el riesgo de padecer de cáncer y otras enfermedades. Este aumento de radicales libres provocó un incremento en el estrés oxidativo en el sistema inmune. Los compuestos producidos por la biodegradación del aspartame (metanol y formaldehído) son considerados tóxicos en grandes concentraciones para varios órganos. El estrés resultante de dichos procesos resulta en una inflamación de los órganos que, junto con los altos niveles de corticosteroides (monitoreados en el mismo estudio), pueden resultar en un efecto inmunosupresivo (Kumar-Choudhary y Sheela-Devi, 2014). Palmnäs et al. (2014) alimentaron ratas con dietas altas en grasas y dietas estándar. Ambos grupos experimentales bebieron agua endulzada con aspartame en dosis de 60 mg/L durante 8 semanas. Las ratas que ingirieron la disolución de aspartame y la dieta alta en grasa presentaron un aumento de masa corporal. Asimismo, estas ratas aumentaron sus niveles de triglicéridos hepáticos. Ambos grupos, dieta alta en grasa + aspartame y dieta normal + aspartame, presentaron niveles elevados de glucosa en ayunas y mala respuesta a la insulina. Se concluyó que el aspartame se metaboliza rápidamente y eleva los niveles de propionato en el intestino alterando la microbiota intestinal (Palmnäs et al., 2014).

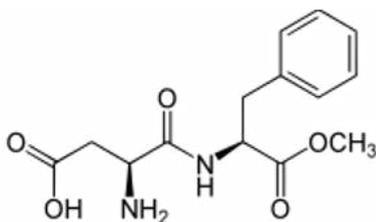


Figura 10. Estructura química del aspartame (Anónimo, 2022e)

Sucralosa: Gupta et al. (2014) suministraron sucralosa (Figura 11) en cantidades elevadas a ratas macho albinas y observaron toxicidad en el páncreas en forma de cálculos, infiltraciones de linfocitos (inflamación) y degeneración de islotes pancreáticos. Por otro lado, Farid et al. (2020) suministraron diferentes dosis de sucralosa a ratones albinos macho y hembra de la estirpe BALB/c. Los autores concluyeron que el consumo de sucralosa incrementó la glicemia, los niveles de acti-

vidad de algunas enzimas hepáticas y los niveles de urea y creatinina.

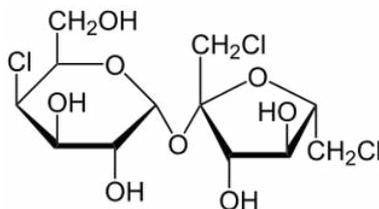


Figura 11. Estructura química de la sucralosa (Anónimo 2022c)

Emulsificantes

Goma arábiga: Longdet y colaboradores (2018) estudiaron en ratas de la estirpe Wistar, el consumo de goma arábiga (Tabla 1a) altera el funcionamiento normal de la química sanguínea y corporal. Se observó pérdida de masa en forma proporcional a la dosis (Tabla 1). Por otro lado, el contenido de glucosa en sangre tuvo un aumento significativo ($p < 0.05$) con respecto del grupo control en intervalos de tiempo específico (cero a 2 horas) (Tabla 1b). El perfil lipídico indicó que el consumo de goma arábiga disminuyó la cantidad de colesterol total y de triglicéridos totales en sangre (Tabla 1c). Lo anterior sugiere una alteración de la homeostasis lipídica. Estos cambios provocados por el consumo de goma arábiga no necesariamente representan efectos adversos. Para esos dos parámetros y las lipoproteínas de baja densidad es positivo su efecto. Estas propiedades podrían utilizarse para formular matrices alimentarias específicas con goma arábiga para personas obesas y tener una pérdida de masa corporal. No obstante, es necesario realizar una investigación más a fondo para revertir el efecto con respecto de la glucosa de la goma arábiga y que pudiera ser útil para personas diabéticas (Longdet et al., 2018).

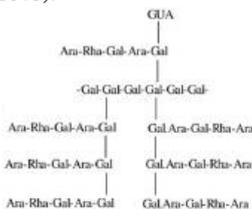


Figura 10. Estructura química del aspartame (Anónimo, 2022e)

Tabla 1a. Relación de masa corporal perdida contra el consumo de goma arábica suministrada a diferentes dosis (Longdet et al., 2018)

Grupos	Masa inicial, g	Masa final, g	Masa perdida, g
Control mg /kg m.c.	170	160	10
200 mg /kg m.c.	170	150	20
400 mg /kg m.c.	170	140	30
600 mg /kg m.c.	170	130	40

Tabla 1b. Efecto de la concentración de goma arábica sobre la glucosa sérica de ratas albinas a diferentes tiempos en porcentaje con respecto del valor del control (Modificada de Longdet et al., 2018)

Grupos	T = 0 h	T = 0.5 h	T = 1 h	T = 2 h
Control mg /kg m.c.	0	0	0	0
200 mg /kg m.c.	40.48	29.29	7.79	20
400 mg /kg m.c.	17.95	12.74	2.71	10
600 mg /kg m.c.	39.82	43.32	16.91	14

Tabla 1c. Efecto de la concentración de goma arábica sobre los perfiles de lípidos y actividades enzimáticas (CT (TC): Colesterol total; TG: Triglicéridos; LAD (HDL): Lipoproteínas de alta densidad; LBD (LDL): Lipoproteínas de baja densidad; ALT: Alanina aminotransferasa; AST: Aspartato aminotransferasa; FAL (ALP): Fosfatasa alcalina) (Modificada de Longdet et al., 2018)

Grupos	CT, %	TG, %	LAD, %	LBD, %	ALT, %	AST, %	FAL, %
Control mg /kg m.c.	0	0	0	0	0	0	0
200 mg /kg m.c.	↓	↓	↑	0	↑	↑	↓
400 mg /kg m.c.	↓	↓	↑	↓	↑	↑	↓
600 mg /kg m.c.	→	↓	↑	↓	↑	↑	↓

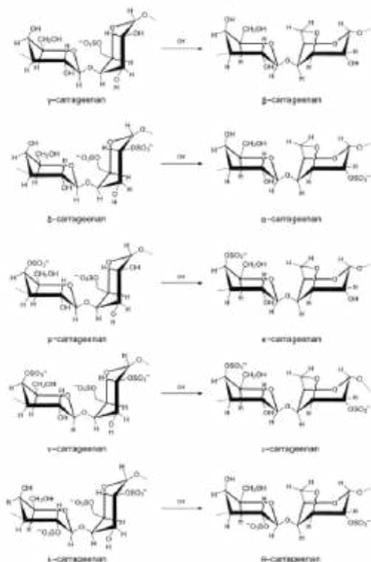
Carragenina: Esta goma, extraída de algas rojas (Figura 13), ha sido estudiada desde varios puntos de vista demostrándose que es potencialmente dañina para la salud (Bhattacharyya et al., 2008, 2012; Borthakur et al., 2012; Komisarska et al., 2024; Tobacman, 2010).

Komisarska et al. (2024) concluye lo siguiente:

“En los últimos años, ha habido un creciente interés en la relación entre los hábitos alimentarios, la disbiosis y la composición de la microbiota intestinal. La inclusión de carragenina en la dieta en estudios ha dado como resultado una disminución en la cantidad de bacterias antiinflamatorias, especialmente A. muciniphilia, exacerbando el crecimiento de la microbiota proinflamatoria. Además, la capa de mucina disminuyó, lo que provocó una disfunción de la barrera intestinal en muchos casos. Esto afectó directamente a las células epiteliales a través de la activación de la vía proinflamatoria NF-kB. No se han realizado

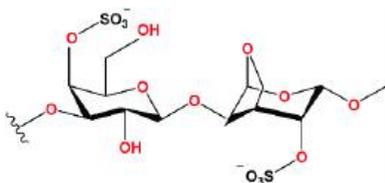
estudios que indiquen predisposiciones genéticas y una menor tolerancia a la carragenina. La investigación en humanos todavía provoca controversia y reticencia. Sin embargo, algunos estudios realizados han demostrado la activación de la colitis ulcerosa (CU) y el acortamiento del tiempo de remisión después de la suplementación con carragenina de alta masa molecular. Una mayoría significativa de estudios indican efectos negativos de la carragenina. El mecanismo se basa en la activación del receptor TLR4, alteraciones en la actividad de los macrófagos, producción de citocinas proinflamatorias y activación de vías inmunitarias innatas. Se han demostrado similitudes entre los efectos de la carragenina y cambios en el gen NOD2/CARD15, que son factores que predisponen para la enfermedad de Crohn a través de la activación de lipopoliglicúridos, LPG, producidos por bacterias Gram-negativas. El grupo más vulnerable a los efectos nocivos de la carragenina son las personas con la enfermedad inflamatoria intestinal, EII.”

(a) Tomado de Wikipedia (2024)
<https://en.wikipedia.org/wiki/Carrageenan>



“Las carrageninas son moléculas grandes y muy flexibles que forman estructuras helicoidales que se enrollan, lo que les da la capacidad de formar una variedad de geles diferentes a temperatura ambiente. Se utilizan ampliamente en la industria alimentaria y en otras industrias como agentes espesantes y estabilizadores. Todas las carrageninas son poliglúcidos de alta masa molecular y están compuestas principalmente por β -D-galactopiranosas (unidades G) con enlaces 3 y α -D-galactopiranosas (unidades D) con enlaces 4 o 3,6-anhidro- α -D-galactopiranosas (unidades DA) con enlaces 4, que forman la unidad repetitiva de diglúcidos de las carrageninas (ver la de la derecha) [Campo et al., 2009]. Existen tres clases comerciales principales de carragenina: La kappa forma geles fuertes y rígidos en presencia de iones de potasio y reacciona con las proteínas lácteas. Se obtiene principalmente de *Kappaphycus alvarezii* [McHugh, 2003] La iota forma geles blandos en presencia de iones de calcio. Se produce principalmente a partir de *Eucheuma denticulatum* [McHugh, 2003]”.

(b) Ejemplo de i-Carragenina (Tomada de las redes internacionales <https://www.researchgate.net/journal/Materials-Advances-2633-5409>)



“Lambda no gelifica y se utiliza para espesar productos lácteos. Las principales diferencias que influyen en las propiedades de la carragenina kappa, iota y lambda son el número y la posición de los grupos de éster de sulfato en las unidades de galactosa repetidas. Los niveles más altos de éster de sulfato reducen la temperatura de solubilidad de la carragenina y producen geles de menor resistencia, o contribuyen a la inhibición del gel (carragenina lambda).” [Food Standards Agency, 2024].”

Figura 13. Estructura genérica de la carragenina o carragenano, como se le conoce también (ver nota al pie al respecto) y texto (Tomado de Wikipedia (2024) <https://en.wikipedia.org/wiki/Carrageenan>).

“Muchas especies de algas rojas producen diferentes tipos de carrageninas durante su historia de desarrollo. Por ejemplo, el género *Gigartina* produce principalmente carrageninas kappa durante su etapa gametofítica y carrageninas lambda durante su etapa esporofítica. Todas son solubles en agua caliente, pero en agua fría, solo la forma lambda (y las sales de sodio de las otras dos) son solubles. Cuando se utiliza en productos alimenticios, la carragenina tiene los números de aditivo de la UE E407 o E407a cuando está presente como ‘alga eucheuma procesada.’” (Tomado de Wikipedia (2024) <https://en.wikipedia.org/wiki/Carrageenan>)

Desafortunadamente, las presiones de empresas transnacionales alimentarias hacia la Organización Mundial de la Salud permite que se adicione carragenina a infinidad de productos consumidos por niños y adultos por igual, desde lácteos hasta cárnicos ya que sus propiedades químicas hacen que absorba cantidades

muy importantes de agua reduciendo el contenido neto de sólidos. Estas mismas propiedades hacen que exista el riesgo de cáncer colorrectal derivado de la enfermedad de Crohn. El tiempo dirá si el derecho a la salud podrá lograr superar los intereses creados de las grandes empresas (Durán-de-Bazúa, 2017).

Afectaciones a la salud relacionadas con la microbiota intestinal

Eubiosis y disbiosis

Como se ha reiterado en estas dos primeras partes, los seres humanos y muchos otros organismos vivos coexisten simbióticamente con diferentes microbiotas en sus organismos. Una de ellas es la intestinal, la cual tiene un vínculo extraordinario entre la salud de la persona y, cuando conviven exitosamente, a esta forma equilibrada se conoce como eubiosis (vida verdadera en griego). La eubiosis es un estado general de salud y equilibrio entre ambos que genera la optimización de la obtención de energía en el huésped. Por el contrario, la disbiosis es un estado alterado de este equilibrio, que se asocia con diversos estados patológicos, y es de origen multifactorial (Gual-Grau, 2019; Marques et al., 2015; Neyrinck et al., 2012).

Se considera a la dieta como un agente clave en el estado de la microbiota intestinal. Asimismo, la disbiosis puede producir obesidad, cambios fisiológicos y metabólicos (Gual-Grau, 2019; Marques et al., 2015; Neyrinck et al., 2012). En la Figura 14 se muestran los desbalances que pueden ocurrir entre la biocomunidades de la microbiota intestinal. En la eubiosis los microorganismos presentes en el epitelio intestinal se benefician de un constante suministro de nutrientes, así como de un ambiente controlado de temperatura y humedad. Por su parte, el hospedero se beneficia de productos bio-transformados, como ácidos grasos de cadena corta y vitaminas.

Asimismo, el hospedero obtiene un mejor desarrollo y funcionamiento del epitelio gastrointestinal. Hay transferencia de nutrientes al hígado y al tejido adiposo (Gual-Grau, 2019). Los filos de mayor dominancia en el tracto gastrointestinal son los Firmicutes y los Bacteroidetes, representando en algunas especies el 90% de los microorganismos presentes en el epitelio intestinal. De manera simplificada la disbiosis se puede determinar con los cambios en la proporción entre estos dos filos. Los cambios de proporción de estos filos bacterianos tienen diversas repercusiones en el organismo (Gual-Grau, 2019).

Los Firmicutes están conformados principalmente por bacterias gram positivas de pared celular rígida o semirrígida. Los géneros predominantes son *Bacillus*, *Clostridium*, *Enterococcus*, *Lactobacillus* y *Ruminococcus*. Los Bacteroidetes incluyen aproximadamente 7000 especies de bacterias gram negativas. Los géneros predominantes de los Bacteroidetes son: *Bacteroides*, *Alistipes*, *Parabacteroides* y *Prevotella* (Gual-Grau, 2019; Stojanov et al., 2020). En general, la disbiosis causada por el aumento en la proporción de Firmicutes produce una enfermedad inflamatoria intestinal como se mostró en la Figura 14 (modificada de Stojanov et al., 2020).

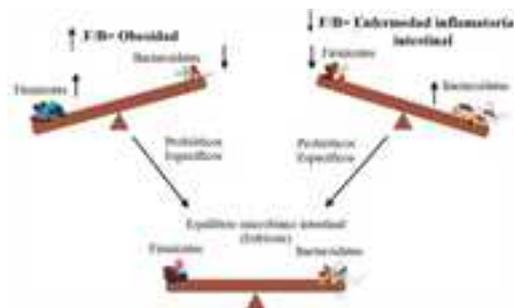


Figura 14. Desbalances que pueden ocurrir en la microbiota intestinal, así como sus correcciones con probióticos (modificada de Stojanov et al., 2020)

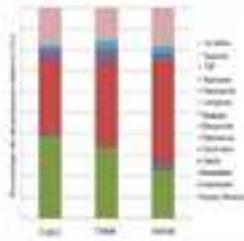


Figura 15a. Cambios observados en la microbiota intestinal después del suministro de cafeína y guaraná, comparados con un grupo control de ratas Wistar saludables (modificado de Silveira et al., 2018)

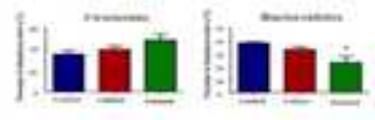


Figura 15b. Cambios observados en las proporciones de Firmicutes y Bacteroidetes tras el suministro de cafeína y guaraná (modificado de Silveira et al., 2018)

Las investigaciones científicas para comprender los efectos que causan diferentes componentes de la dieta se basan en la generación *ex profeso* de disbiosis en modelos animales. De esta forma se estudian diferentes parámetros bioquímicos y otros cambios en el organismo en estudio. En la investigación de Silveira et al. (2018) se estudiaron los efectos del suministro de cafeína (0.0007 g/kg), de guaraná (*Paullinia cupana*) que es una planta originaria del Amazonas; es un ingrediente común de las bebidas energéticas y puede ser peligroso en grandes cantidades; contiene cafeína, <https://medlineplus.gov/spanish/druginfo/natural/935.html#FoodInteractions>) (0.021 g/kg) y solución salina (1 mL/kg como control) por 21 días a ratas Wistar. Se observaron diversos cambios en las proporciones de sus filos bacterianos como se muestran en las Figuras 15a y b con un énfasis en Firmicutes y Bacteroidetes (Silveira et al., 2018).

Ellos vieron la disminución de *Lactobacillus* causada por el suministro de cafeína. *Lactobacillus* es uno de los microorganismos comúnmente usados como probióticos y actúa como bioindicador de una microbiota intestinal saludable. Además, este tipo de microorganismos produce exopolisacáridos (macromoléculas de hidratos de carbono o carbohidratos o glúcidos y proteínas sintetizados por bacterias y acumulados de forma extracelular basadas en moléculas de glucosa no de sacarosa), los cuales ayudan a la regulación intestinal y al crecimiento de microorganismos beneficios (Silveira et al., 2018). La disbiosis intestinal causada por la cafeína y el guaraná también provocó cambios bioquímicos en el organismo

de las ratas (en el colon, los riñones y el hígado). Hubo modificaciones significativas en la actividad enzimática: Marcadores de desintoxicación y estrés oxidativo, así como de citocinas proinflamatorias. Los investigadores consideraron la continuación de estudios sobre la disbiosis empleando otros compuestos químicos que permitan evaluar los cambios de la microbiota intestinal o las proporciones de diversos microorganismos con efectos adversos.

La disbiosis no es solamente la pérdida de diversidad microbiana: Un cambio drástico de la proporción de los microorganismos es suficiente para tener repercusiones severas en el organismo (Silveira et al., 2018). En este caso, aunque los antioxidantes suministrados (cafeína y guaraná) mejoraron la homeostasis redox de las ratas produjeron disbiosis intestinal. Por lo tanto, se debe tener cuidado en su consumo ya que el beneficio del poder antioxidante puede ser menor que el efecto adverso sobre la microbiota. El objetivo sería el de encontrar la proporción correcta del consumo de antioxidantes similares obteniendo una homeostasis redox sin producir disbiosis (Silveira et al., 2018). La disbiosis puede provocar diversas alteraciones del sistema del hospedero o anfitrión. Un pequeño resumen se presenta a continuación y después se da el ejemplo de las consecuencias de las alteraciones al sistema inmune. Y, finalmente, en la tercera parte se verá una propuesta de solución: La medicina preventiva dirigida hacia la microbiota intestinal.

Repercusión de la dieta en enfermedades como obesidad, cáncer, descalcificaciones e inflamación intestinal

La microbiota intestinal influye en la homeostasis energética de las personas por lo que puede afectar directamente el desarrollo de obesidad y trastornos metabólicos como la resistencia a la insulina y la diabetes. De igual modo, la microbiota puede regular algunos genes del hospedero (anfitrión) que controlan procesos metabólicos. La microbiota intestinal al regular algunos genes de procesos metabólicos altera el fenotipo del hospedero. De este modo los microorganismos pueden hacer que el hospedero (anfitrión) presente obesidad y alterar, en cierto grado, la motilidad intestinal (Hernandez-Baixauli et al., 2021).

Algunos microorganismos se relacionan particularmente con el metabolismo de carbohidratos o glúcidos. Estos microorganismos consiguen energía extra de la dieta ya que metabolizan sustratos no digeribles por el hospedador o anfitrión. Muchas bacterias intestinales regulan la secreción de péptidos intestinales. Como consecuencia de la secreción de estos péptidos intestinales ocurre una alteración del tejido adiposo y la composición de los ácidos grasos. Incluso, algunos microorganismos activan respuestas inflamatorias mediante la secreción de lipopoliglicidos, derivados de la glucosa y no de la sacarosa (erróneamente sacáridos, pues colegas hace muchos años confundieron los términos, como masa y peso, cuando la sacarosa es un glúcido también, formado por glucosa y fructosa, un disacárido) (Khare et al., 2020; Li, 2014).

En la sociedad occidental la obesidad tiene una constante tendencia a la alza, producto de la dieta que consume y otros factores de origen médico. En la actualidad se ha buscado relacionar la microbiota intestinal con el tipo de dieta y con el desarrollo de la obesidad. Se ha reportado una baja proporción de bacterias pertenecientes al filo Bacteroidetes y poca diversidad bacteriana en individuos obesos en comparación con individuos con masas corporales normales (Gual-Grau, 2019).

Cotillard et al. (2013) describieron la riqueza bacteriana en el intestino como una medida de la salud de un individuo (midiendo la cantidad de genes bacterianos). Los autores encontraron una relación entre la obesidad y la resistencia a la insulina con bacterias pertenecientes a géneros proinflamatorios como Bacteroides y Parabacteroides. Los individuos con una baja diversidad bacteriana presentaron una desregulación metabólica más pronunciada, acompañada de inflamaciones sistémicas leves. Los ácidos grasos de cadena corta son marcadores bacterianos de estado saludable ya que son producidos por microorganismos como Lactobacillus. La abundancia de Lactobacillus es considerada un indicador de salud de la microbiota intestinal. Los ácidos grasos de cadena corta (AGCC) son los productos finales de la degradación de algunos carbohidratos. Estos ácidos grasos de cadena corta pueden ejercer múltiples efectos benéficos sobre el metabolismo de los mamíferos, tal como se muestra en la Figura 16.

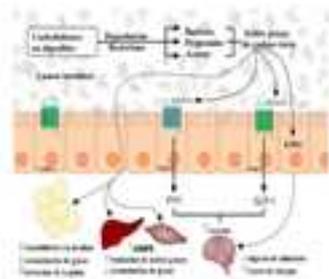


Figura 16. Generación de ácidos grasos de cadena corta (AGCC) por degradación bacteriana de carbohidratos no digeribles, su reconocimiento en GPR41 y GPR43 o receptores celulares que captan los AGCC así como su traslado a células del intestino para la formación de gluconeogénesis (GNG, que es el proceso de obtención de glucosa a partir de los propios productos de descomposición o de los productos de descomposición de los lípidos (grasas) o las proteínas) y su traslado a células L que es un tipo de células secretoras específicas del intestino delgado distal y colon, productoras de PYY, que es una señal hormonal que participa como una señalización de la cantidad de adiposidad y sobre la ingesta en el

organismo y GLP-1, que es una señal hormonal que ayuda a controlar la función del páncreas, haciendo que se produzca más insulina después de las comidas, manteniendo los niveles de glucosa en intervalos saludables (sensación de saciedad en el cerebro). Del mismo modo, los AGCC inducen aumento de AMPK (quinasa activada por AMP, que es un complejo enzimático dependiente de proporciones de ATP y AMP, el cual ayuda a “apagar” rutas metabólicas que gastan ATP y consumen AMP, permitiendo la conservación de energía en forma de ATP y oxidación de ácidos grasos en el hígado, así como secreción de leptina (modificada de Gual-Grau, 2019)

Por tanto, la composición de la microbiota es un determinante clave para una producción equilibrada de AGCC. Por el contrario, las personas obesas no tienen una producción favorable de AGCC, sino una generación alta de propionato. La producción de AGCC se favorece cuando los sustratos que los producen son expuestos a una microbiota saludable (Gual-Grau, 2019). Para comprobar la influencia de la dieta sobre el incremento de masa y la obesidad se utiliza comúnmente la llamada dieta de cafetería. Esta dieta consiste en una elección libre de alimentos representativos de la dieta occidental ricos en alta energía, como tocino, pan, café, papas fritas, hamburguesas, etc. La dieta de cafetería comúnmente se asocia con la hiperfagia, debido a una falta de sensación de saciedad. Esta hiperfagia conduce al desarrollo de obesidad y otras

enfermedades como la hipertensión o la diabetes. Del mismo modo, existen dietas como las que son altas en grasa y la alta en grasa y sacarosa, con alta cantidad de energía. La ingesta de dietas de cafetería, la dieta alta en grasa y la dieta alta en grasa y sacarosa, influyen de modos distintos en la microbiota intestinal de las ratas Wistar, como se muestra en la Figura 17.

La dieta de cafetería promueve una disbiosis severa intestinal y altera el metabolismo de los ácidos biliares, así como la producción de ácidos grasos de cadena corta. Esto desencadena un aumento de orina y excreción de toxinas urémicas, que se definen como aquellas que resultan de la retención renal en la Enfermedad Renal Crónica (ERC) y que contribuyen al deterioro de múltiples funciones bioquímicas y fisiológicas, denominado Síndrome Urémico. Además, aumenta la excreción de metabolitos asociados con estrés oxidativo e inflamación sistémica. Por el contrario, las dietas a base de alimentos ricos en fibra dan como resultado fenotipos mucho más saludables, con una modesta acumulación de grasa corporal y sin promover cambios en el microbioma intestinal ni en sistemas metabólicos urinarios (Gual-Grau, 2019). Las ratas Wistar son más susceptibles a presentar alteraciones de la microbiota intestinal que otros tipos de ratas. Se ha observado que la dieta de cafetería altera la proporción de bacterias

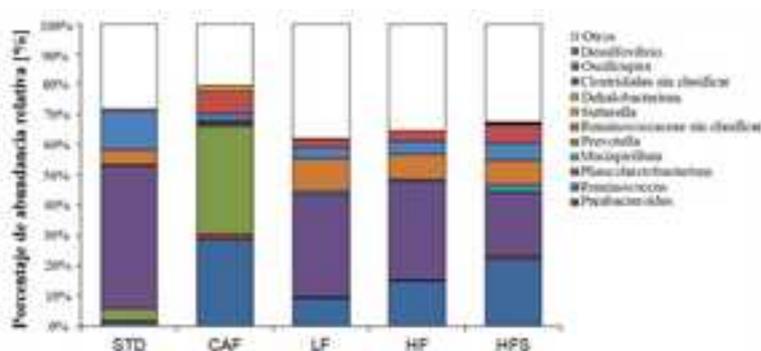


Figura 17. Abundancia relativa de los géneros bacterianos más alterados por distintas dietas en la microbiota intestinal de ratas Wistar: La dieta estándar (STD, standard), la dieta de cafetería (CAF), la dieta baja en grasas (LF, low fat), la dieta alta en grasas (HF, high fat) y la dieta alta en grasas y sacarosa (HFS, high fat and sucrose) (modificado de Gual-Grau, 2019)

del género *Lactobacillus*, reduciendo su abundancia de una manera importante. En ratas Wistar, se han probado distintas dietas con el fin de obtener dietas que se consideren como saludables en relación con la microbiota intestinal. La suplementación con proantocianidinas ha mostrado que se contrarresta el incremento de la relación de Bacteroidetes/Firmicutes. Algunos alimentos 'biotransformados', como la piel de calabaza o la malta utilizada para la elaboración de cerveza actúan como prebióticos naturales, disminuyendo el pH, produciendo gas y

ácidos grasos de cadena corta, AGCC y generando perfiles metabólicos saludables (Gual-Grau, 2019).

La ingesta de quercetina y resveratrol (Figuras 18a,b) también ha demostrado ser benéfica en la disminución de masa corporal limitando la inflamación producida en ratas de la estirpe Wistar con obesidad inducida en dietas altas en grasas. Su inclusión en la dieta provoca la disminución de abundancia de bacterias del filo Firmicutes.

Figura 18a.

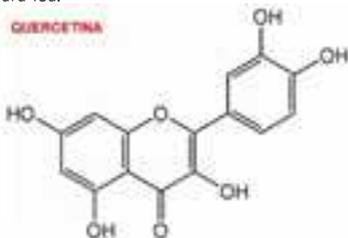


Figura 18a. Estructura química de la quercetina (Anónimo, 2010)

Figura 18b.

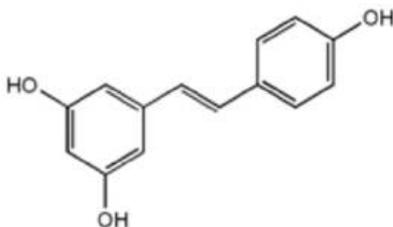


Figura 18b. Estructura química del resveratrol (Anónimo, 2022f)

La disminución de la abundancia de bacterias del filo Firmicutes altera la cantidad de energía absorbida de la dieta. La ingesta de quercetina y el resveratrol causaron cambios drásticos en la abundancia de familias microbianas. Estos compuestos redujeron notablemente la cantidad de bacterias pertenecientes a familias bacterianas relacionadas con la obesidad, tales como Lachnospiraceae, Desulfovibrionaceae, Acidaminococcaceae, Coriobacteriaceae y bacterias del género *Bilophila*. Asimismo, mejoraron la abundancia relativa de otros géneros bacterianos de la microbiota intestinal (Zhao et al., 2017).

Se ha intentado asociar el cáncer con el tipo de dieta consumida en diferentes poblaciones. Por ejemplo, se ha comprobado que hombres asiáticos con una dieta abundante en soja tienen una incidencia mucho menor de cáncer de próstata, comparados contra los hombres europeos o estadounidenses. Sin embargo, los hombres asiáticos al migrar a distintas naciones pierden dicha protección, planteando

la hipótesis de que probablemente exista algo más que la genética influyendo sobre estos casos (Cook et al., 1999). En ratas macho de la estirpe Wistar se provocó carcinogénesis en próstata con el fin de estudiar la relación entre el consumo de genisteína y cáncer de próstata. Para ello los autores suministraron genisteína (Figura 18c) a dosis de 250 mg/kg de masa corporal durante 11 meses. Los autores concluyeron que las ratas con genisteína incluida en su dieta presentaron una mayor protección contra el cáncer de próstata. Además, no se observó toxicidad ni aumento de masa en los testículos ni en la próstata. Se cree que la genisteína inhibe una ruta enzimática de proliferación celular mediada por estrógenos que provoca el cáncer. La genisteína al inhibir esa ruta metabólica inhibe el desarrollo de cáncer de próstata. Además, la genisteína no provoca toxicidad en la descendencia. La concentración de genisteína resultante en el suero sanguíneo de las ratas macho de la estirpe Wistar fue similar a la encontrada en hombres asiáticos adultos (Wang et al., 2002).

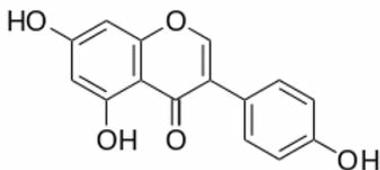


Figura 18c. Estructura química de la genisteína (Anónimo, 2020)

La relación entre la calcificación de los huesos y la microbiota intestinal es otro ejemplo de los efectos en el organismo de la microbiota intestinal en conjunto con la dieta. La vitamina K se produce mediante la microbiota intestinal (principalmente mediante bacterias pertenecientes a los géneros *Bacteroides* y *Bifidobacterias*). Esta vitamina se ve involucrada en procesos de calcificación de los huesos, activando proteínas que regulan la fijación del calcio en ellos. En ratas Wistar hembra se ha demostrado que la vitamina K puede reducir la pérdida progresiva del volumen del hueso vertebral. Sin embargo,

no puede detener la pérdida de calcio una vez que ha comenzado a difundirse por los huesos. En la osteopenia, una forma de pérdida ósea menos grave que la osteoporosis, caracterizada por pérdida de densidad mineral ósea o presencia de densidad ósea menor a la considerada normal la vitamina K mejora la mineralización del hueso al mejorar la síntesis de osteocalcina, únicamente producida por los osteoblastos (Figura 19) y es la proteína no colágena más abundante de la matriz extracelular y es la décima proteína más abundante en los vertebrados (Rubert y De-la-Piedra, 2020), mejorando las propiedades estructurales de la columna vertebral. Es por ello que la descalcificación, así como su opuesto, una buena salud estructural de los huesos, dependen no solamente de la dieta sino también de la regulación de la microbiota intestinal. Lo anterior es debido a que la microbiota produce los cofactores necesarios para poder utilizar a los minerales, ya que uno, sin el otro resulta totalmente irrelevante (Xin et al., 2001).

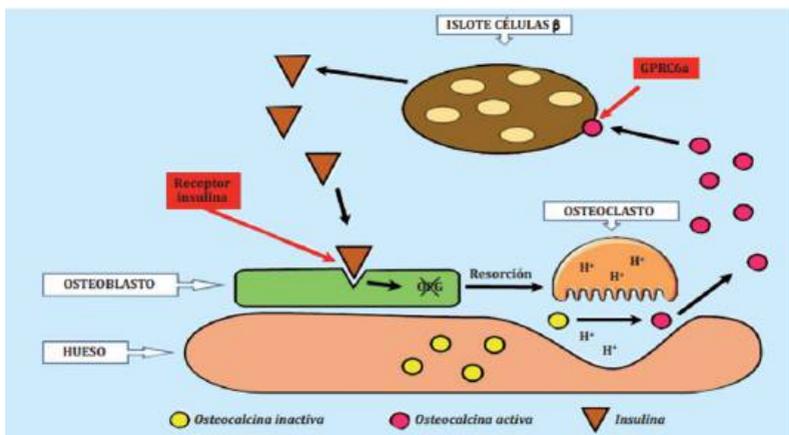


Figura 19. "Ciclo osteocalcina-insulina. La osteocalcina descarboxilada, forma activa, se une al receptor GPRC6a de las células β pancreáticas, provocando la liberación de insulina. La insulina se une entonces al receptor de la insulina en el osteoblasto, provocando una disminución de la síntesis de osteoprotegerina y un aumento de la resorción ósea. En el ambiente ácido del osteoclasto, la osteocalcina inactiva, gamma carboxilada, se convierte en activa, nocarboxilada. La osteocalcina activa vuelve a comenzar el ciclo uniéndose a las células β de los islotes pancreáticos" (cortesía de Rubert y De-la-Piedra, 2020, basada en Wei y Karsenty, 2014)

En la constante investigación sobre la microbiota intestinal, se ha hablado extensamente de los modos de revertir la disbiosis intestinal mediante el consumo de *Lactobacillus*. Como se mencionó antes, una proporción baja de estas bacterias es una señal de posible disbiosis intestinal en un individuo (Hart et al., 2004). Existen microorganismos de la microbiota intestinal que tienen efectos inmunomoduladores, concretamente bacterias ácido-lácticas, como propusieron Hart et al. (2004). Estos autores plantearon que el consumo de *Lactobacillus* ayudaba en la disminución de células T citotóxicas y la respuesta de células B, impulsada por

Th1. Del mismo modo, Hart et al. (2004) propusieron que *Lactobacillus casei* tiene efecto modulador de las células dendríticas lo cual explica la función correcta de las células T, ya que su producción depende del tipo y grado de maduración de la célula dendrítica. El consumo de estos probióticos podría mostrar una modulación de las células Th1 y Th2. Los probióticos pueden exhibir actividad adyuvante en la defensa inmune, además de mostrar mecanismos antiinflamatorios que previenen reacciones alérgicas (Hart et al., 2004).

Enfermedades autoinmunes

Una enfermedad autoinmune es una afección en la que el sistema inmune no funciona bien y ataca al propio cuerpo del individuo. Las enfermedades autoinmunes están controladas por los genes del hospedero y una intervención del ambiente. Los propios órganos del individuo son los objetivos de ataque del sistema inmune, ya que la especificidad antígeno/anticuerpo se ve afectada. Las enfermedades autoinmunes ocurren hasta en un 5% de la población. Entre las más comunes están 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 y 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 que son el sustento de las células nerviosas generando 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. La inflamación cerebral puede surgir a partir de inflamaciones sistémicas provenientes de cualquier alteración del sistema inmunológico. Para el tratamiento de esta patología hay una serie de fár-

macos 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).

Sin embargo, debe considerarse que existen muchas otras enfermedades y afecciones que hoy en día se estudian y se sospecha cada vez más que están relacionadas con la microbiota intestinal.

A continuación, en la Tabla 1 se muestran ejemplos de algunas enfermedades en las que se ha encontrado que existe una relación con la microbiota intestinal.

Tabla 1. Ejemplos de algunas de las enfermedades relacionadas con la microbiota intestinal

Enfermedad	Definición	Avances de investigación
Parkinson / Sarcopenia	<p>“Enfermedad caracterizada por la pérdida de masa muscular, fuerza y funcionamiento de los músculos en los adultos mayores. Los signos y síntomas incluyen debilidad, cansancio o fatiga, falta de energía, problemas de equilibrio y dificultades para caminar y mantenerse de pie. La pérdida de masa muscular o la debilidad en ocasiones provocan caídas, rotura de huesos y otras lesiones graves que afectan la capacidad de la persona para cuidar de sí misma. La edad avanzada, hacer muy poco o nada de ejercicio y una nutrición inadecuada aumentan el riesgo de sarcopenia. Las personas con cáncer también pueden presentar sarcopenia” (NCI, 2024)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Presencia de inflamación intestinal (disbiosis) en personas con Parkinson de edad avanzada (Bordoni, et al., 2019; Castillo-Álvarez y Marzo-Sola, 2019) • Eje intestino-cerebro como principal clave de comprensión de la enfermedad (Castillo-Álvarez y Marzo-Sola, 2019) • Investigaciones en ratones muestran bacterias intestinales relacionadas con las regulaciones bioquímicas de acumulación de α-sinucleína, proteína neuronal expresada comúnmente en las terminaciones nerviosas y presinápticas del cerebro (depósitos que indican disfunción neuronal y muerte) (Man et al., 2021) • Pacientes muestran microbiota distinta a la normal: Aumento de <i>Ralstonia</i> spp (proteobacteria inflamatoria) • Disminución de <i>Blaulia</i> spp., <i>Coprococcus</i> spp. y <i>Roseburia</i> spp (productoras de AGCC) • Asociación del uso de permetrina (insecticida que provoca Parkinson) con enfermedad inflamatoria intestinal (Bordoni et al., 2019; Man et al., 2021)
Miocardiopatía isquémica	<p>Estrechamiento de arterias que llevan sangre al corazón, provocando paredes de arterias delgadas.</p> <p>También se explica como una arterioesclerosis crónica, favoreciendo formación de trombos e infartos agudos del miocardio (McCafferty et al., 2012)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Se ha demostrado que la alteración en la microbiota intestinal con vancomicina reduce los niveles de leptina, hormona que promueve la señalización de saciedad en el cerebro, cuyos receptores están presentes en los riñones y en el miocardio (McCafferty et al., 2012) • Cambios significativos en la microbiota durante el período isquémico e infarto: aumento de bacterias de los géneros y filos <i>Synergistetes</i>, <i>Espiroquetas</i>, <i>Lachnospiraceae</i>, <i>Syntrophomonadaceae</i>, <i>Eubacteriaceae</i>, <i>Dethiosulfovibrionaceae</i>, <i>Tissierella soehngenia</i> (Wu et al., 2017) • Deterioro simultáneo de la microbiota y el epitelio intestinal como consecuencia del déficit de circulación sanguínea (Wu et al., 2017) • Aumento de bacterias del género <i>Lachnospiraceae</i> (productores de butirato como respuesta a la necesidad de recuperación del colon) (Wu et al., 2017)

Enfermedad	Definición	Avances de investigación
Enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC)	Deficiencia respiratoria y limitación del flujo de aire en conjunto con estrés oxidativo, inflamación sistémica, desequilibrio de proteasas/antiproteasas (equilibrio natural del organismo que, de no mantenerse, el exceso de proteasas en el organismo comienzan a digerir componentes de la matriz intersticial de células pulmonares), además del aumento de vulnerabilidad del pulmón a patógenos (Wu et al., 2021)	<ul style="list-style-type: none"> • El humo de cigarros y cigarrillos produce disbiosis de la microbiota del tracto respiratorio que normalmente apoya al sistema inmune contra la colonización de patógenos produciendo destrucción de la función inmunitaria (Wu et al., 2021) • Pruebas realizadas con 8 yerbas medicinales chinas (<i>Hedysaureum multijugum</i> Maxim, <i>Atractylodes macrocephala</i> Koidz, <i>Saposhnikoviae radix</i>, <i>Sinapis semen</i>, <i>Fritillariae thunbrigii</i> Bulbus, <i>Mori cortex</i>, <i>Curcumae rhizoma</i>, <i>Panax notoginseng</i>) demuestran efectos benéficos contra la EPOC provocada por humo de cigarro en ratas, mostrando niveles más bajos de NLRP3 (proteína receptora que funciona como un potente inductor de inflamación, relacionada ampliamente con la EPOC aguda) e IL-18 (Wu et al., 2021) • Las ratas Wistar sometidas al humo de cigarro mostraron cambios en su microbiota pulmonar: Aumento de bacterias pertenecientes a los géneros <i>Ralstonia</i>, <i>Mycoplasma</i>, <i>Halomonas</i>, <i>Dizetzia</i> y disminución de las bacterias pertenecientes a los géneros <i>Lactobacillus</i> y <i>Bacteroides</i> (Wu et al., 2021)
Epilepsia	<p>Trastorno cerebral provocado por varios mecanismos, como la alteración de redes neuronales, inflamación de las neuronas, etc.</p> <p>Los procesos inflamatorios dentro del cerebro son comúnmente el mecanismo crucial de estudio, así como la inflamación periférica (Citraro et al., 2021)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Los modelos animales muestran que la epilepsia tiene una mayor incidencia en pacientes con inflamación intestinal (Citraro et al., 2021) • Grupos de microorganismos se han asociado con la inflamación intestinal, la cual puede migrar al cerebro por vía sanguínea, causando epilepsia (Citraro et al., 2021) • Ratas de estirpe Wistar con genética específica para generar epilepsia muestran cambios en su microbiota intestinal a temprana edad (junto con inflamación del íleon y el colon) (Citraro et al., 2021) • Las ratas con epilepsia tienen una relación <i>Bacteroides/Firmicutes</i> más baja a la edad de un mes cuando las crisis aún no se presentan (Citraro et al., 2021) • Aumento de <i>A. muciniphila</i> en estudios con Parkinson, esclerosis o Alzheimer (Citraro et al., 2021) • Las ratas con crisis epilépticas presentan una disbiosis más severa, así como aumento de bacterias pertenecientes a los filos <i>Proteobacterias</i> y <i>Tenericutes</i>, con una importante reducción de bacterias del género <i>Lactobacillus</i> (Citraro et al., 2021) • Trasplantes de materia fecal de ratas Wistar sanas ayuda con la reducción de crisis y recuperación intestinal (Citraro et al., 2021)

Enfermedad	Definición	Avances de investigación
Alzheimer	Demencia comúnmente a edad avanzada que genera pérdidas de memoria, y disociaciones cognitivas, siendo la principal causa de demencia en el mundo, con muy poco conocimiento sobre su causa. (Castillo-Álvarez y Marzo-Sola, 2019)	<ul style="list-style-type: none"> Se han intentado asociar numerosos microorganismos a su patogenia, a través de autopsias. Las especies asociadas son <i>Chlamydomyxa pneumoniae</i>, <i>Borrelia burgdorferi</i> y algunas espiroquetas. Estas bacterias se relacionan con la acumulación de placas de β-amiloide, péptido esencial en la transmisión de información entre neuronas, comúnmente asociada a la enfermedad de Alzheimer, pero con múltiples funciones no asociadas con esta enfermedad (Castillo-Álvarez y Marzo-Sola, 2019) Al igual que en la enfermedad de Parkinson, se ve implicado <i>H. pylori</i> (Castillo-Álvarez y Marzo-Sola, 2019) La presencia de β-amiloide se ha asociado con la abundancia de taxones inflamatorios como <i>Escherichia</i> o <i>Shigella</i> y las citocinas proinflamatorias, así como un descenso de la especie <i>Eubacterium rectale</i> (Castillo-Álvarez y Marzo-Sola, 2019)
Hipertensión	Enfermedad caracterizada por una tensión arterial elevada superior al promedio considerado como saludable, esta enfermedad comúnmente incrementa el riesgo de sufrir cardiopatías, encefalopatías y nefropatías (OMS, 2021)	<ul style="list-style-type: none"> Existen evidencias de actividad vasomotora disminuida en ratas libres de gérmenes, así como menos sensibilidad a catecolaminas, adrenalina y noradrenalina (Knauf et al., 2019) Estudios de ratas y humanos muestran una relación entre la hipertensión y la baja diversidad microbiana (Knauf et al., 2019) Trasplantes de materia fecal de ratas Wistar hipertensas a ratas sanas provocaron aumentos de presión arterial (Knauf et al., 2019) Estudios metabólicos mostraron contenido elevado de acetato y heptanoato en los AGCC, previo al inicio del aumento de presión arterial (Knauf et al., 2019) Ratones que tienen receptores acoplados a proteína G huérfanos (oGPCR) poseen un potencial sin explotar para el descubrimiento de fármacos. Este receptor se encuentra en arteriolas renales, células de músculo liso y vasos sanguíneos periféricos, sensibles al acetato, al propionato y, parcialmente, al lactato; comúnmente se activa con estos ácidos grasos de cadena corta, AGCC, produciendo renina. Si no lo tienen los ratones se muestran hipotensos a lo largo de su vida (Knauf et al., 2019) Los AGCC actúan regulando la presión arterial tanto alta como baja, siendo perfilados mediante la microbiota intestinal como un tratamiento contra la hipertensión (Knauf et al., 2019)

Enfermedad	Definición	Avances de investigación
Enfermedad renal crónica ERC	La ERC es una insuficiencia renal que provoca que no se filtre la sangre debidamente, provocando acumulación de metabolitos tóxicos, provocando daños como la formación de diabetes, hipertensión y nefropatía diabética (Knauf et al., 2019; Medicine Plus, 2024; Sueyoshi et al., 2019)	<ul style="list-style-type: none"> • La ERC constantemente se ve acompañada en su sintomatología con problemas digestivos como estreñimiento (Knauf et al., 2019; Sueyoshi et al., 2019) • El consumo de adenina es un modelo de estudio que genera insuficiencia renal al metabolizarse depositándose en cristales en 2,8- dihidroxiadenina en las microvellosidades de los túbulos renales, generando insuficiencia renal en ratas de estirpe Wistar mostró un aumento de permeabilidad intestinal y toxinas urémicas como el indoxil sulfato que provoca mala regulación de metabolismos del oxígeno en los túbulos renales y supresión de la producción de eritropoyetina, hormona generada en los riñones que estimula la producción de glóbulos rojos en la médula ósea (Knauf et al., 2019; Sueyoshi et al., 2019) • Las ratas Wistar alimentadas con lactulosa mostraron una reducción de taxones bacterianos productores de indol (precursor de indoxil-sulfato) (Knauf et al., 2019; Sueyoshi et al., 2019) • La lactulosa se menciona como posible prebiótico atribuible a mejorar la función renal y los niveles de indoxil sulfato en suero (Knauf et al., 2019; Sueyoshi et al., 2019)

De acuerdo con este resumen de enfermedades y su relación con la disbiosis, es clara la importancia de continuar estudiando la microbiota intestinal para lograr la eubiosis a través de una dieta saludable para gozar de una salud plena.

Conclusiones

De acuerdo con las investigaciones presentadas en este segundo artículo de los tres programados es evidente que el uso de aditivos alimentarios en los alimentos y bebidas procesados de forma industrializada no garantiza una dieta saludable y la microbiota sana residente estas sustancias químicas extrañas, por lo que deberá

buscarse la forma de volver a las preparaciones y conservación de alimentos tradicionales como las que se empleaban en la época precolombina como el achicalado (Durán-Domínguez-de-Bazúa, 2020) o los alimentos tradicionales asiáticos que mantenían la salud como fuente natural de la genisteína.

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 / Conflicts of interest

Los autores y la autora expresan que no existen conflictos de interés en la redacción del manuscrito / *The authors express that there are no conflicts of interest in the writing of the manuscript.*

Referencias

- Abuel-Zahab, H., El-Khyat, Z., Sidhom, G. 1997. Physiological effects of some synthetic food colouring additives on rats. *Bollettino Chimico Farmaceutico*. 136(10): 615-627.
- Abou-Donia, M., El-Masry, E., Abdel-Rahman, A., McLendon, R., Schiffman, S. 2008. Splenda alters gut microflora and increases intestinal P-glycoprotein and cytochrome P-450 in male rats. *Journal of Toxicology and Environmental Health Part A*. 21: 1415-1429. <https://doi.org/10.1080/15287390802328630>
- Anderson, R.L., Kirkland, J.J. 1980. The effect of sodium saccharin in the diet on caecal microflora. *Food and Cosmetics Toxicology*. 18(4): 353-355. [https://doi.org/10.1016/0015-6264\(80\)90188-1](https://doi.org/10.1016/0015-6264(80)90188-1)
- Anónimo. 2010. Quercetina. [En línea]. Recuperado de <https://www.iqb.es/nutriceutica/quercetina.jpg>. [Fecha de consulta 02/09/2022].
- Anónimo. 2019a. Eritrosina. <https://es.wikipedia.org/wiki/Eritrosina#/media/Archivo:Erythrosine.svg>
- Anónimo. 2019b. Acesulfame-K. <https://quimicafacil.net/wp-content/uploads/2019/03/Acesulfamo-k.jpg>
- Anónimo. 2021a. Curcumina. <https://es.wikipedia.org/wiki/Curcumina>
- Anónimo. 2021b. Benzoato de sodio. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/c9/Sodium_Benzoate_V.1.svg/270px-Sodium_Benzoate_V.1.svg.png
- Anónimo. 2022a. Monoglutamato de sodio. https://es.wikipedia.org/wiki/Glutamato_monos%C3%B3dico#/media/Archivo:Monosodium_glutamate_Structural_Formula_V1.svg
- Anónimo. 2022b. Sulfito de sodio anhidro. <https://vichemic.pl/wp-content/uploads/2019/11/7757-83-7.jpg>
- Anónimo. 2022c. Sucralosa. <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/c1/Sucralose.svg/330px-Sucralose.svg.png>

¹ Caecal: 1. Relacionado con el caecum, parte del intestino grueso. 2. Forma usada en el Reino Unido para cecal (<https://dictionary.cambridge.org>). El intestino grueso se conecta con el intestino delgado mediante la válvula o esfínter ileo-cecal (Atlas de Histología Vegetal y Animal, Depto. de Biología Funcional y Ciencias de la Salud, Facultad de Biología, Universidad de Vigo, España. <https://mmegias.webs.uvigo.es/2-organos-a/imagenes-grandes/digestivo-grueso.php#:~:text=El%20intestino%20grueso%20se%20conecta,exterior%20a%20trav%C3%A9s%20del%20ano>)

- Anónimo. 2022d. Sacarina. <https://es.wikipedia.org/wiki/Sacarina#/media/Archivo:Saccharin.svg>
- Anónimo. 2022e. Aspartame. <https://es.wikipedia.org/wiki/Aspartamo#/media/Archivo:Aspartame.svg>
- Anónimo. 2022f. Resveratrol. [En línea]. Recuperado de <https://es.wikipedia.org/wiki/Resveratrol#/media/Archivo:Resveratrol.png>. [Fecha de consulta 02/09/2022].
- Bhattacharyya, S., O-Sullivan, I., Katyal, S., Unterman, T., Tobacman, J.K. 2012. Exposure to the common food additive carrageenan leads to glucose intolerance, insulin resistance and inhibition of insulin signaling in HepG2 cells and C57BL/6j mice. *Diabetologia*. 55(1):194-203
- Bhattacharyya, S., Dudeja, P.K., Tobacman, J.K. 2008. Carrageenan-induced NF B activation depends on distinct pathways mediated by reactive oxygen species and Hsp27 or by Bcl10. *Biochim. Biophys. Acta (BBA) Gen. Subj.* 1780: 973-982.
- Bhattacharyya, S., Gill, R., Chen, M.L., Zhang, F., Linhardt, R.J., Dudeja, P.K., Tobacman, J.K. 2008. Toll-like receptor 4 mediates induction of the Bcl1-NF B-Interleukin-8 inflammatory pathway by carrageenan in human intestinal epithelial cells. *The J. Biol. Chem.* 283(16):10550-10558.
- Borthakur, A., Bhattacharyya, S., Anbazhagan, A.N., Kumar, A., Dudeja, P.K., Tobacman, J.K. 2012. Prolongation of carrageenan-induced inflammation in human colonic epithelial cells by activation of an NF B-BCL10 loop. *Biochim. Biophys. Acta (BBA) Mol. Basis Dis.* 1822: 1300-1307.
- Bian, X., Chi, L., Gao, B., Tu, P., Ru, H., Lu, K. 2017a. The artificial sweetener acesulfame potassium affects the gut microbiome and body 'weight'² gain in CD-1 mice. *PLoS ONE*. 12(6): 1-16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0178426>
- Bian, X., Tu, P., Chi, L., Gao, B., Ru, H., Lu, K. 2017b. Saccharin induced liver inflammation in mice by altering the gut microbiota and its metabolic functions. *Food and Chemical Toxicology*. 107: 530-539. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2017.04.045>

²Weight (peso en español) no es sinónimo de masa (mass en inglés) pero hasta la fecha se siguen confundiendo por un error conceptual debido al uso de las básculas para pesar a las personas, que ejercen una fuerza, el peso, en newtons para determinar la masa de la persona en kilogramos (nota de la tercera autora quien hasta hace pocos años también los confundía)

- Bordoni, L., Gabbianelli, R., Fedeli, D., Fiorini, D., Bergheim, I., Jin, C.J., Marinelli, L., Di-Stefano, A., Nasuti, C. 2019. Positive effect of an electrolyzed reduced water on gut permeability, fecal microbiota and liver in an animal model of Parkinson's disease. *Public Library of Science ONE*, 14(10): 1-17.
- Brial, F., Matsuda, F., Gauguier, D. 2021. Diet dependent impact of benzoate on diabetes and obesity in mice. *Biochimie*. 194: 35-42. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2021.12.010>
- Campo, V.L., Kawano, D.F., Braz-da-Silva Jr., D., Carvalho, I. 2009. Review. Carrageenans: Biological properties, chemical modifications and structural analysis – A review. *Carbohydrate Polymers*. 77: 167-180. doi:10.1016/j.carbpol.2009.01.020
- Cao, Y., Liu, H., Qin, N., Ren, X., Zhu, B., Xia X. 2020. Impact of food additives on the composition and function of gut microbiota: A review. *Trends in Food & Science Technology*. 99: 295-310. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.03.006>
- Carraro-Foletto, K., Melo-Batista, B.A., Magagnin-Neves, A., de-Matos Feijó, F., Reis-Ballard, C., Marques-Ribeiro, M.F., Casaccia-Bertoluci, M. 2016. Sweet taste of saccharin induces 'weight'³ gain without increasing caloric intake, not related to insulin-resistance in Wistar rats. *Appetite*. 96: 604-610. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2015.11.003>
- Casanova-Martí, A., Serrano, J., Portune, K. J., Sanz, Y., Blay, M. T., Terra, X., Ardévol, A., Pinent, M. 2017. Grape seed proanthocyanidins influence gut microbiota and enteroendocrine secretions in female rats. *Food Function*. 9(3): 1672–1682. <https://doi.org/10.1039/C7FO02028G>
- Castillo-Álvarez, F., Marzo-Sola, M.E. 2019. Papel de la microbiota intestinal en el desarrollo de diferentes enfermedades neurológicas. *Neurología*. 37: 492-498. <https://doi.org/10.1016/j.nrl.2019.03.017>
- Chacar, S., Itani, T., Hajal, J., Saliba, Y., Louka, N., Faivre, J. F., Maroun, R., Fares, N. 2018. The impact of long-term intake of phenolic compounds-rich grape pomace on rat gut microbiota. *Journal of Food Science*. 83: 246-251. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14006>

- Ciardi, C., Jenny, M., Tschoner, A., Ueberall, F., Patsch, J., Pedrini, M., Ebenbichler, C., Fuchs, D. 2011. Food additives such as sodium sulphite, sodium benzoate and curcumin inhibit leptin release in lipopolysaccharide-treated⁴ murine adipocytes in vitro. *British Journal of Nutrition*. 107(06): 826–833. <https://doi.org/10.1017/s0007114511003680>
- Citraro, R., Lembo, F., De-Caro, C., Tallarico, M., Coretti, L., Iannone, L.F., Leo, A., Palumbo, D., Cuomo, M., Buomino, E., Nesci, V., Marascio, N., Iannone, M., Quirino, A., Russo, R., Calignano, A., Constanti, A., Russo, E., De-Sarro, G. 2021. First evidence of altered microbiota and intestinal damage and their link to absence epilepsy in a genetic animal model, the WAG/Rij rat. *Epilepsia*. 62(2): 529-541. <https://doi.org/10.1111/epi.16813>
- Čoklo, M., Maslov, D.R., Pavelić, S.K. 2020. Modulation of gut microbiota in healthy rats after exposure to nutritional supplements. *Gut Microbes*. 12(1): 1-28. <https://doi.org/10.1080/19490976.2020.1779002>
- Cook, S., Goldoft, M., Schartz, S. M., Weiss, N. S. 1999. Incidence of adenocarcinoma of the prostate in Asian immigrants to the United States of America and their descendants. *The Journal of Urology*. 161(1): 152-155. [https://doi.org/10.1016/S0022-5347\(01\)62086-X](https://doi.org/10.1016/S0022-5347(01)62086-X)
- Rubert, M., De-la-Piedra, C. 2020. La osteocalcina: de marcador de formación ósea a hormona; y el hueso, un órgano endocrino / Osteocalcin: From marker of bone formation to hormone; and bone, an endocrine organ. *Revista de Osteoporosis y Metabolismo Mineral*. 12(4):146-151. <https://dx.doi.org/10.4321/s1889-836x2020000400007>
- Cotillard, A., Kennedy, S., Kong, L., Prifti, E., Pons, N., Le Chatelier, E, Almeida, M., Quinquis, B., Levenez, F., Galleron, N., Gougis, S., Rizkalla, S., Batto, J., Renault, P., Dore, J., Zucker, J., Clement, K., Dusko, S. 2013. Dietary intervention impact on gut microbial gene richness. *Nature*. 500(7464): 585-588. <https://doi.org/10.1038/nature12480>

⁴Aquí hay autores usando el término 'sacáridos' en vez de glúcidos: Lo correcto sería lipopoliglúcido ya que lo que está en la molécula es la glucosa no la sacarosa (nota de la última autora)

- Delgado-Palacio, S. 2005. Microbiota intestinal humana: Análisis y evolución de poblaciones representativas e identificación de bacterias probióticas. Tesis de Doctorado. Universidad de Oviedo. Departamento de Biología Funcional. Área de Microbiología. Oviedo, España.
- Tomada de Mitsuoka, T. 1992. Intestinal flora and aging. *Nutrition Reviews*. 50(12): 438-446. file:///C:/Users/Dra%20Duran/Downloads/TESIS20Susana20Delgado.pdf
- Durán-de-Bazúa, M.d.C. 2017. Aditivos: Negocios a la moda. Parte IV. RD-ICUAP. 3(2):1-31. <https://icuap.buap.mx/sites/default/files/revista/2017/02/aditivos.pdf>
- Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C. 2020. Alimentos chatarra y las bebidas endulzadas en los tiempos del Covid-19. RD-ICUAP. 6(18):1-16. <https://rd.buap.mx/ojs-dm/index.php/rdicuap/article/view/doi/214>
- Eweka, A., Igbigbi, P., Ucheya, R. 2011. Histochemical studies of the effects of monosodium glutamate on the liver of adult Wistar rats. *Annals of Medical and Health Science Research*. 1(1): 21-30.
- Eweka, A., Om'Iniabohs, F. 2008. Histological studies of the effects of monosodium glutamate on the inferior colliculus of adult Wistar rats. *Electronical Biomedical Journal*. 3: 24-30.
- Farid, A., Hesham, M., El-Dewak, M., Amin, A. 2020. The hidden hazardous effects of stevia and sucralose consumption in male and female albino mice in comparison to sucrose. *Saudi Pharmaceutical Journal*. 28(10): 1290-1300. <https://doi.org/10.1016/j.jsps.2020.08.019>
- Food Standards Agency. 2024. Approved additives and E numbers. Additives and E numbers for colours, preservatives, antioxidants, sweeteners, emulsifiers, stabilisers, thickeners and other types of additives. https://www.food.gov.uk/business-guidance/approved-additives-and-e-numbers#h_6
- Ganiger, S., Malleshappa, H. N., Krishnappa, H., Rajashekhar, G., Ramakrishna-Rao, V., Sullivan, F. 2006. A two generation reproductive toxicity study with curcumin, turmeric yellow, in Wistar rat. *Food and Chemical Toxicology*. 45(1): 64-69. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2006.07.016>

- García-Fuentes, A., Wirtz, S., Vos, E., Verhagen, H. 2015. Short review of sulphites as food additives. *European Journal of Nutrition & Food Safety*. 5(2): 113-120. <https://doi.org/10.9734/EJNFS/2015/11557>
- 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, Facultat de Química. Tarragona, España.
- Gupta, S., Kalra, S., Bharihoke, V., Dhurandhar, D. 2014. Sucralose induced pancreatic toxicity in albino rats: Histomorphological evidence. *Journal of Morphological Sciences*. 31(02): 123-127. <https://doi.org/10.4322/jms.073614>
- Hernandez-Baixauli, J., Puigbò, P., Torrell, H., Palacios-Jordan, H., Ripoll, V., Caimari, A., Bas, J., Baselga-Escudero, L., Mulero, M. 2021. A pilot study for metabolic profiling of obesity-associated microbial gut dysbiosis in male Wistar rats. *Biomolecules*. 11(2): 303-325.
- 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>
- Jasso-Padilla, I., Juárez-Flores, B., Alvarez-Fuentes, G., De la Cruz-Martínez, A., González-Ramírez, J., Moscosa-Santillán, M., González-Chávez, M., Oros-Ovalle, C., Prell, F., Czermak, P., Martínez-Gutiérrez, F. 2017. Effect of prebiotics of *Agave salmiana* fed to healthy Wistar rats. *Journal of Science and Food Agriculture*. 97: 556-563. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7764>
- Khare, S., DeLoid, G. M., Molina, R. M., Gokulan, K., Couvillion, S. P., Bloodsworth, K. J., Eder, E. K., Wong, A. R., Hoyt, D. W., Bramer, L. M., Metz, T. O., Thrall, B. D., Brian, J. D., Demokritou, P. 2020. Effects of ingested nanocellulose on intestinal microbiota and homeostasis in Wistar Han rats. *Nanoimpact*. 18: 100216. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2020.100216>
- Knauf, F., Brewer, J.R., Flavell, R.A. 2019. Immunity, microbiota and kidney disease. *Nature Reviews Nephrology*. 15(5): 263-274. <https://doi.org/10.1038/s41581-019-0118-7>

- Komisarska, P., Pinyosinwat, A., Saleem, M., Szczuko, M. 2024. Carrageenan as a potential factor of inflammatory bowel diseases. *Nutrients*. 16: 1367. <https://doi.org/10.3390/nu16091367>
- Korpela, K. 2018. Diet, microbiota, and metabolic health: Trade-Off between saccharolytic and proteolytic 'fermentation'⁵. *Annual Review of Food Science and Technology*. 9: 65–84. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-030117-012830>
- Kumar-Choudhary, A., Sheela-Devi, R. 2014. Imbalance of the oxidant-antioxidant status by aspartame in organs of immune system of Wistar albino rats. *Academic Journals*. 8(8): 229-230. <https://doi.org/10.5897/AJPP2013.3838>
- Li, R. 2014. Microbiome. En *Encyclopedia of Food Microbiology*. Batt, A., Tortorello, M., eds. Academic Press, 2ª ed., pp. 788-792. Nueva York, EE. UU.
- Longdet, I., Eyibo, A., Istifanus, G., Blessing, O., Bogolnaan, A., Denkok, Y. 2018. Determination of the effect of gum arabic on body 'weight'⁶ and some biochemical parameters on albino Wistar rat. *European Journal of Nutrition & Food Safety*. 8(1): 14-19. <https://doi.org/10.9734/EJNFS/2018/37914>
- Man, W.K., Tahirbegi, B., Vrettas, M.D., Preet, S., Ying, L., Vendruscolo, M., De-Simone, A., Fusco, G. 2021. The docking of synaptic vesicles on the presynaptic membrane induced by α -synuclein is modulated by lipid composition. *Nature Communications*. 12(1): Article number 927. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21027-4>
- 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>

⁵Fermentation en inglés es fermentación en español. Este nombre fue dado por Louis Pasteur a la reacción de la glucosa catalizada por la levadura *Saccharomyces cerevisiae* en ambiente anaerobio para obtener alcohol etílico y bióxido de carbono en forma estequiométrica. En los años 70 del siglo veinte en un congreso internacional de expertos en lo que ahora se conoce como biotecnología (biochemical engineering then) se decidió que la palabra fermentación sería solamente para este caso y que las demás se denominarían biorreacciones (bioreactions) y los equipos donde se realizaran sería biorreactores (bioreactors) y no fermentadores (nota de la última autora)

⁶Weight (peso) and mass (masa) no son sinónimos. El peso es una fuerza aplicada a los cuerpos y se mide en Newtons y la masa es una propiedad de los cuerpos y se mide en kilogramos (nota de la última autora)

- McCafferty, K., Byrne, C., Yaqoob, M. 2012. Intestinal microbiota determine severity of myocardial infarction in rats. *The Federation of American Societies of Experimental Biology Journal*. 26(11): 1-2. <https://doi.org/10.1096/fj.12-1102LTR>
- McHugh, D.J. 2003. A guide to the seaweed industry. *FAO Fisheries Technical Paper* 441. Food and Agriculture Organization of the United Nations. www.fao.org. Roma, Italia.
- 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>
- MedicinePlus. 2024. U.S. Department of Health and Human Services, National Institutes of Health, Bethesda, MD, Estados Unidos. <https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/000471.htm>
- Mitsuoka, T. 1992. Intestinal flora and aging. *Nutrition Reviews*. 50(12): 438-446.
- Moutinho, I., Bertges, L., Assis, R. 2007. Prolonged use of the food dye tartrazine (FD&C yellow N°5) and its effects on the gastric mucosa of Wistar rats. *Brazilian Journal of Biology*. 67(1): 141-145. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842007000100019>
- NCl. 2024. Definición de sarcopenia. Instituto Nacional del Cáncer, Estados Unidos. <https://www.cancer.gov/espanol/publicaciones/diccionarios/diccionario-cancer/def/sarcopenia>
- 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
- 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>
- OMS. 2021. Hipertensión. [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/hypertension#:~:text=La%20hipertensi%C3%B3n%20\(o%20tensi%C3%B3n%20arterial,encefalopat%C3%ADas%2C%20nefropat%C3%ADas%20y%20otras%20enfermedades](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/hypertension#:~:text=La%20hipertensi%C3%B3n%20(o%20tensi%C3%B3n%20arterial,encefalopat%C3%ADas%2C%20nefropat%C3%ADas%20y%20otras%20enfermedades)

- Palmnäs, M.S.A., Cowan, T.A., Bomhof, M.R., Su, J., Reimer, R.A., Vogel, H.J., Hittel, D.S., Shearer, J. 2014. Low-dose aspartame consumption differentially affects gut microbiota-host metabolic interactions in the diet-induced obese rat. *PLoS ONE*. 9(10): 1-12. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0109841>
- 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>
- Restrepo-Gallego, M. 2007. Sustitución de colorantes en alimentos. *Revista Lasallista de Investigación*. 4(1): 35-39.
- Risdon, S., Meyer, G., Marziou, A., Riva, C., Roustit, M., Walther, G. 2020. Artificial sweeteners impair endothelial vascular reactivity: Preliminary results in rodents. *Nutrition Metabolism and Cardiovascular Diseases*. 30: 843-846. <https://doi.org/10.1016/j.numecd.2020.01.014>
- Silveira, A.K., Moresco, K.S., Gomes, H.M., da Silva Morrone, M., Grun, L.K., Gelain, D.P., de Mattos Pereira, L., Giongo, A., Rodrigues de-Oliveira, R., Fonseca Moreira, J.C. 2018. Guarana (*Paullinia cupana* Mart.) alters gut microbiota and modulates redox status, partially via caffeine in Wistar rats. *Phytotherapy Research*. 32(12): 2466-2474. <https://doi.org/10.1002/ptr.6185>
- Stojanov, S., Berlec, A., Štrukelj, B. 2020. The influence of probiotics on the Firmicutes/Bacteroidetes ratio in the treatment of obesity and inflammatory bowel disease. *Microorganisms*. 8(11): 1-16. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8111715>
- Sueyoshi, M., Fukunaga, M., Mei, M., Nakajima, A., Tanaka, G., Murase, T., Narita, Y., Hirata, S., Kadowaki, D. 2019. Effects of lactulose on renal function and gut microbiota in adenine-induced chronic kidney disease rats. *Clinical and Experimental Nephrology*. 23: 908-919. <https://doi.org/10.1007/s10157-019-01727-4>
- Suez, J., Korem, T., Zeevi, D., Zilberman-Schapira, G., Thaiss, C.A., Maza, O., Israeli, D., Zmora, N., Gilad, S., Weinberger, A., Kuperman, Y., Harmelin, A., Kolodkin-Gal, I., Shapiro, H., Halpern, Z., Segal, E., Elinav, E. 2014. Artificial sweeteners induce glucose intolerance by altering the gut microbiota. *Nature*. 514: 181-186. <https://doi.org/10.1038/nature13793>

- Tobacman, J.K. 2010. Review of harmful gastrointestinal effects of carrageenan in animal experiments. *Environmental Health Perspectives*. 109(10): 983-994. <https://doi.org/10.1289/ehp.01109983>
- Vasantharaja, D., Ramalingam, V., Aadinaath-Redy, G. 2014. Oral toxic exposure of titanium dioxide nanoparticles on serum biochemical changes in adult male Wistar rats. *Nanomedicine Journal*. 2(1): 46-53.
- Vicente, C. 2018. Estructura química de la goma arábica. https://www.researchgate.net/figure/Estructura-quimica-de-la-goma-arabiga_fig5_324769211
- Wang, J., Eltoun, I., Lamartiniere, C. 2002. Dietary genistein suppresses chemically induced prostate cancer in Lobund-Wistar rats. *Cancer Letters*. 186(1): 11-18. [https://doi.org/10.1016/S0304-3835\(01\)00811-4](https://doi.org/10.1016/S0304-3835(01)00811-4)
- Wei, J., Karsenty, G. 2015. An overview of the metabolic function of osteocalcin. *Rev. Endocr. Metab. Disord*. 16:93-98. doi: 10.1007/s11154-014-9307-7
- Wopara, I., Uwaezuoke, C. A., Ike, A. 2019. The effect of some synthetic food colorants on selected biochemical indices of male Wistar rats. *European Journal of Nutrition and Food Safety*. 10(29): 149-155. <https://doi.org/10.9734/ejnf/s/2019/v10i230107>
- Wu, Y.-Y., Qiao, B., Zhang, Q., Jia, W.-Q., Meng, H., Xing, H.-J., Li, Y.-Q., Yang, Z.-S., Yuan, J.-L. 2021. Yifei Sanjie Formula treats chronic obstructive pulmonary disease by regulating lung microbiota dysbiosis. *Research Square*. 1(1): 1-19. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-850383/v1>
- Wu, Z.X., Li, S.F., Chen, H., Song, J.X., Gao, Y.F., Zhang, F., Cao, C.F. 2017. The changes of gut microbiota after acute myocardial infarction in rats. *Plos ONE*. 12(7): 1-13. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0180717>
- Xin, F., Takemitsu, M., Atsuta, Y. 2001. Effect of vitamin K2 on lumbar vertebral bone: Histomorphometric analyses in experimental osteoporotic rats. *Journal of Orthopaedic Science*. 6(6): 535-539. <https://doi.org/10.1007/s007760100009>
- Zhao, L., Zhang, Q., Ma, W., Tian, F., Shen, H., Zhou, M. 2017. A combination of quercetin and resveratrol reduces obesity in high-fat diet-fed rats by modulation of gut microbiota. *Food Funct*. 8: 4644-4652. DOI: 10.1039/c7fo01383c

LA CIENCIA DETRÁS DE LA ELABORACIÓN DE UNA CERÁMICA: UN ARTE CON HISTORIA Y CONOCIMIENTO

THE SCIENCE BEHIND TRADITIONAL CERAMICS:
AN ART WITH HISTORY AND KNOWLEDGE

Hugo Daniel Ramírez Macín
Luis Ángel Estrada Guzmán
Pilar Rodríguez Márquez
María Sebastiana Pedraza Chan
Alejandro Escobedo Morales*

Facultad de Ingeniería Química, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla,
Avenida San Claudio y 18 Sur, C.P. 72570 Puebla, Puebla, México.

Autor de correspondencia: luis.aguilar@correo.buap.mx*
mareug.castro@correo.buap.mx*

Correos:

rm225570100@alm.buap.mx
luis.estrada@alumno.buap.mx
pilar.rodriguez@alumno.buap.mx
maria.pedrazachan@correo.buap.mx
alejandrosobedo@correo.buap.mx

<https://orcid.org/0009-0002-4002-2899>
<https://orcid.org/0009-0007-9179-8132>
<https://orcid.org/0009-0007-6200-3337>
<https://orcid.org/0000-0003-1361-4493>
<https://orcid.org/0000-0002-8701-8785>

FOLIO: A11N99.25/1015

Resumen

La cerámica ha acompañado a la humanidad por milenios. Frecuentemente, su elaboración combina arte y ciencia, donde la selección y preparación de la materia prima hasta el control de cada uno de los procesos involucrados es importante para lograr que una pieza, además de útil, tenga cualidades estéticas. En México hay una gran variedad de estilos de cerámica derivados de la tradición y los recursos naturales disponibles en cada localidad. Particularmente en Puebla, además de la reconocida cerámica de Talavera, existen otras de alta calidad con raíz en los pueblos originarios. Ejemplo de ello es el barro bruñido elaborado en Los Reyes Metzontla, comunidad popoloca enclavada en la reserva de la biosfera de Tehuacán-Cuicatlán. En este artículo se describen los pasos generales para la fabricación de piezas cerámicas, haciendo énfasis en los cambios físicos y químicos de la materia prima en cada uno de ellos, tomando como ejemplo el barro bruñido de Los Reyes Metzontla, que justamente puede catalogarse como arte en cerámica.

Palabras clave: cerámica; proceso; barro bruñido, Los Reyes Metzontla.

Abstract

Pottery has accompanied humankind for millennia. Their production frequently combines art and science, where selecting and preparing the raw materials properly, as well as controlling each process involved, are important issues to ensure that ceramics are not only useful items but also beautiful. In Mexico, there is a wide variety of ceramic styles derived from the traditions and natural resources available in each locality. In Puebla, in addition to the renowned Talavera pottery, there are other high-quality pottery pieces rooted in indigenous peoples. An example is the burnished clay produced in Los Reyes Metzontla, a Popoloca community nestled in the Tehuacán-Cuicatlán biosphere reserve. This article describes the general steps for the manufacture of ceramic pieces, emphasizing the physical and chemical changes in the raw material in each step, taking as an example the burnished clay from Los Reyes Metzontla, which can rightly be classified as ceramic art.

Keywords: ceramics; process; burnished clay, Los Reyes Metzontla.

La cerámica ha acompañado a la humaLa palabra cerámica proviene del griego κέραμος (kéramos), que significa arcilla, y cuyo origen se remonta a un término en Sanscrito para hacer referencia a la acción de quemar. Así, los griegos utilizaban esta palabra para designar utensilios de arcilla que para su elaboración habían sido puestos en contacto con fuego. En este punto es importante diferenciar los términos cerámica y cerámico. Hoy día continuamos empleando la palabra cerámica con la misma acepción, pero incluyendo otros objetos utilitarios o estructurales como muebles sanitarios, ladrillos, pisos, azulejos, refractarios, entre otros. Por su parte, el término cerámico hace referencia a una clase de materiales que se distinguen de otros grupos por su composición química, microestructura y propiedades (Cuéllar Herrera et al., 2023; Kingery et al., 1976). Aunque, no debe sorprendernos que con frecuencia son usados indistintamente.

Las cerámicas han formado parte de la historia de la humanidad desde hace milenios. Probablemente, su fabricación comenzó tan pronto como los grupos humanos aprendieron a controlar el fuego. Así, junto con la necesidad de agua y la disponibilidad de arcilla, se conjuntaron los elementos necesarios para su fabricación: agua-tierra-fuego. Diversos fragmentos de cerámica han sido hallados alrededor de todo el mundo. Entre las muestras más antiguas de cerámica destaca la “Venus de Vestonice”. Esta pieza asociada al culto de la fertilidad fue hallada en la República Checa, y data de hace más de 25000 años (Carter y Norton, 2013).

La elaboración de cerámica involucra una serie de procesos que transforman la arcilla, y otros materiales basados en sílice, en objetos resistentes y duraderos; muchos de ellos inocuos. Estos procesos incluyen: la preparación de la materia prima, el conformado, el secado y la cocción. Adicionalmente, las piezas cerámicas pueden tener tratamientos superficiales con fines decorativos y/o funcionales. La ciencia y la técnica que subyace en cada proceso se basa en la comprensión de las propiedades físicas y químicas de los materiales cerámicos,

y en cómo éstos se pueden manipular y transformar a través de la temperatura.

En México hay una infinidad de lugares donde se hace uso de arcilla natural para fabricar distintos tipos de utensilios y objetos ornamentales. Cada sitio ha vertido en su proceso de fabricación de cerámica su propia historia, resultando en una amplia variedad de estilos. Aunque muchas de las piezas cerámicas artesanales son comercializadas sólo a nivel local, también las hay aquellas que por su alta calidad de hechura y estética son reconocidas a nivel nacional e internacional. En este sentido, Puebla destaca por su loza blanca, más conocida como Talavera (Cervantes, 1939). Esta cerámica proviene a su vez de la mayólica de origen árabe-español, que a lo largo del periodo novohispano fue adaptada y enriquecida hasta adquirir su estilo propio. Sin embargo, en el Estado de Puebla existen otras cerámicas de alta calidad con raíz en los pueblos originarios. Ejemplo de ello es el barro bruñido elaborado en Los Reyes Metzontla. En este artículo se describen los pasos involucrados en la fabricación de piezas cerámicas, haciendo énfasis en los cambios físicos y químicos que ocurren en la materia prima durante el proceso. Esto con la intención de difundir las implicaciones técnicas-científicas que hay detrás de la elaboración de una pieza cerámica, tomando como ejemplo el barro bruñido que se elabora en Los Reyes Metzontla, que justamente puede catalogarse como arte.

Los Reyes Metzontla: la cuna del barro bruñido

Los Reyes Metzontla es una comunidad de origen Popoloca localizada en el municipio de Zapotitlán Salinas, dentro de la reserva de la biosfera Tehuacán-Cuicatlán declarada patrimonio mundial por La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) en 2018 (UNESCO, 2018). El grupo étnico Popoloca jugó un papel importante en el proceso civilizatorio de la región del Valle de Tehuacán, ya que contribuyeron a la domesticación del maíz, la explotación de la sal y la fabricación de cerámica. De ésta última, se tienen

registros de que el pueblo Popoloca ya dominaba el arte de la alfarería hacia el año 2300 a.C. (Domínguez Espinosa, 2016), lo que fue favorecido al poderse encontrar toda la materia prima necesaria en los alrededores: terrenos ricos en diferentes tipos de arcillas, a las que los pobladores llaman barro amarillo, gris, colorado y negro; vegetación de la que se extrae pigmentos blanco, rojo y amarillo; aglutinante de cera de abeja; y leña y ramas secas obtenidas de las parcelas de cultivo como combustible. Así, los pobla-

dores actuales del Valle de Tehuacán son herederos de una importante tradición cultural. Ejemplo de ello, es que la comunidad de Los Reyes Metzontla fue acreedora del Premio Nacional de Ciencias y Artes en el campo de artes y tradiciones populares por parte del Gobierno de México (El Periódico del Magisterio, 2005), y más tarde, el 14 de julio de 2012 se inauguró el Centro Comunitario "Metzontla, Alfarería y Ecoturismo" por la asociación de Artesanas y Artesanos Alfareros Popolocas de Los Reyes Metzontla A.C. (Figura 1).



Figura 1. (a) Reserva la biosfera Tehuacán-Cuicatlán. (b) Centro Comunitario "Metzontla, Alfarería y Ecoturismo", Los Reyes Metzontla, Zapotitlán Salinas, Puebla.

La ciencia detrás de una técnica ancestral

La elaboración de cerámica artesanal involucra una serie de técnicas y procesos que se han perfeccionado y transmitido de generación en generación. Cada pieza que nace de la creatividad, habilidad y técnicas aplicadas por el artesano es única, lo que le da un valor intrínseco, a diferencia de las cerámicas fabricadas industrialmente. No obstante, las cerámicas de todo el mundo también tienen aspectos en común relacionados con la materia prima y los procesos básicos de fabricación. La elaboración de una cerámica requiere invariablemente de al menos tres ingredientes que son mezclas homogéneamente añadiendo agua: un agente plástico (arcilla, caolín), un agente árido o desgrasante (sílice, chamota), y un fundente (óxido de hierro, feldspatos).

La arcilla, el principal componente de una pasta cerámica, se caracteriza por su capacidad de absorber agua y brindar a ésta su distintiva plasticidad que permite el conformado de la pieza. La mayoría de las arcillas empleadas en la fabricación de cerámicas son de naturaleza sedimentaria, y en cuanto a su composición química, éstas son aluminosilicatos hidratados con

diferentes contenidos de metales alcalinos o alcalinotérreos (Morari Do Nascimento, 2021). La formación de los silicatos se debe al hecho de que los átomos de silicio se enlazan a cuatro átomos de oxígeno, formando el macroanión $(\text{SiO}_4)^{4-}$. Este grupo de átomos forma un tetraedro (Figura 2) con el átomo de Si al centro y los átomos de oxígeno en los vértices, pudiendo enlazarse con cationes metálicos, o bien, conectarse a otros grupos $(\text{SiO}_4)^{4-}$, generando estructuras complejas y variadas. Particularmente, en los aluminosilicatos algunos átomos de Si son sustituidos por Al. Para los diferentes aluminosilicatos, aunque el elemento estructural base es el mismo, varían en contenido de aluminio, orden de las distintas capas atómicas, intercambio lateral y posición relativa de los átomos.

La ciencia detrás de una técnica ancestral

La elaboración de cerámica artesanal involucra una serie de técnicas y procesos que se han perfeccionado y transmitido de generación en generación. Cada pieza que nace de la creatividad, habilidad y técnicas aplicadas por el artesano es

única, lo que le da un valor intrínseco, a diferencia de las cerámicas fabricadas industrialmente. No obstante, las cerámicas de todo el mundo también tienen aspectos en común relacionados con la materia prima y los procesos básicos de fabricación. La elaboración de una cerámica requiere invariablemente de al menos tres ingredientes que son mezclados homogéneamente añadiendo agua: un agente plástico (arcilla, caolín), un agente árido o desgrasante (sílice, chamota), y un fundente (óxido de hierro, feldespatos).

La arcilla, el principal componente de una pasta cerámica, se caracteriza por su capacidad de absorber agua y brindar a ésta su distintiva plasticidad que permite el conformado de la pieza. La mayoría de las arcillas empleadas en la fabricación de cerámicas son de naturaleza sedimentaria, y en cuanto a su composición química, éstas son aluminosilicatos hidratados con diferentes contenidos de metales alcalinos o alcalinotérreos (Morari Do Nascimento, 2021). La formación de los silicatos se debe al hecho de que los átomos de silicio se enlazan a cuatro átomos de oxígeno, formando el macroanión $(\text{SiO}_4)^{4-}$. Este grupo de átomos forma un tetraedro (Figura 2) con el átomo de Si al centro y los átomos de oxígeno en los vértices, pudiendo enlazarse con cationes metálicos, o bien, conectarse a otros grupos $(\text{SiO}_4)^{4-}$, generando estructuras complejas y variadas. Particularmente, en los aluminosilicatos algunos átomos de Si son sustituidos por Al. Para los diferentes aluminosilicatos, aunque el elemento estructural base es el mismo, varían en contenido de aluminio, orden de las dis-

tintas capas atómicas, intercambio lateral y posición relativa de los átomos.

Otras arcillas empleadas comúnmente en la preparación de pastas cerámicas son el caolín $(\text{AlSi}_2\text{O}_5(\text{OH})_4)$ y la bentonita $[(\text{Al}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + n\text{H}_2\text{O}]$. Estos materiales son empleados para modular la plasticidad de la pasta cerámica y evitar la formación de grietas. El caolín proviene de la roca metamórfica llamada caolinita. Ésta se forma a partir del grupo $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{2-}$ que se enlaza a cationes Al^{3+} coordinados por aniones O^{2-} y OH^- , formando un octaedro (Figura 3). Las distintas capas atómicas se encuentran dispuestas de manera paralela y unidas mediante átomos puente, con posibilidad de que algunos macroaniones sean saturados por iones metálicos (K^+ , Na^+ y Ca^{2+}).

Otra característica importante de las arcillas es la distribución del tamaño de sus partículas (granulometría), pues ésta tiene una influencia notable sobre la plasticidad, la capacidad de absorción, el grado de encogimiento, la velocidad de secado y la fluidización de la pasta cerámica, de modo que juega un papel crucial para el éxito de los procesos que seguirán en la elaboración de una pieza cerámica (Scott, 2006). En general, el tamaño de las partículas de arcilla es inferior a una micra (una micra equivale a la milésima parte de un milímetro), teniendo un área de superficie extensa que favorece su capacidad de adsorción. Para lograr la granulometría deseada frecuentemente se recurre a procesos de molienda exhaustivos (Morales Gueto, 2005).

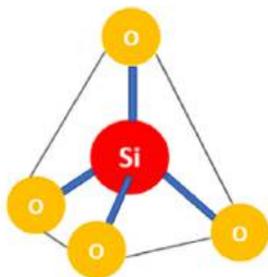


Figura 2. Macroanión $(\text{SiO}_4)^{4-}$ base de la sílice y de los diferentes aluminosilicatos.

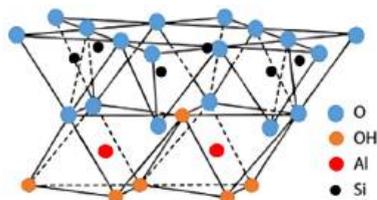


Figura 3. Esquema de la estructura cristalina de la caolinita.

El agente árido, muchas veces añadido como sílice vítrea, arena, cuarzo, obsidiana o chamota (cerámica molida), tiene por función contrarrestar el exceso de plasticidad de la arcilla, al tiempo que refuerza la estructura de la pasta cerámica, incrementando su resistencia mecánica. A excepción de la chamota, los agentes áridos están compuestos por dióxido de silicio (SiO_2); material abundante en la corteza terrestre (Chong Bejarano, 2016).

El último de los ingredientes primordiales de una pasta cerámica es el fundente, este tiene por función reducir la temperatura de cocción de la pasta cerámica, permitiendo que los distintos componentes se unan mediante un proceso llamado sinterización, que es la unión de partículas sólidas sometidas a altas temperaturas (Kingery et al., 1976). Entre los fundentes más empleados está el óxido de hierro (Fe_2O_3) y el feldespato sódico o albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$). Al fundirse estos compuestos forman agrupaciones o redes que pueden conectarse mediante iones metálicos Al^{3+} , Fe^{3+} y Mg^{2+} coordinados por átomos de oxígeno, al tiempo que sellan la porosidad de la pieza.

Una vez mezclados los ingredientes que componen la pasta cerámica, es importante estudiar su comportamiento para determinar su utilidad en la fabricación de piezas cerámicas. Probablemente, la característica más importante de una pasta cerámica es su plasticidad; siendo ésta la propiedad que tiene un material de deformarse permanentemente bajo la acción de una fuerza sin romperse o agrietarse (Callister y Rethwisch, 2018). Entre las pruebas más recurrentes para su determinación está el método de bola (Andrade et al., 2011; Morales Gueto, 2005). Este consiste en someter a carga una esfera de pasta cerámica de 100 g y diámetro D entre dos placas planas hasta que se observa su agrietamiento, registrándose la carga P y la distancia d entre las placas.

El índice de plasticidad I_p de la pasta cerámica se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$I_p = P(D - d) \quad (1)$$

Una vez acondicionada la pasta cerámica, el siguiente paso en la elaboración de una cerámica es el conformado (dar forma). Este proceso puede realizarse mediante técnicas variadas, en cualquier caso, se debe tener en cuenta que la cantidad de agua apropiada ayudará a que el manejo del amasado y conformado de la pieza se realice exitosamente. En el caso del barro bruñido, las técnicas de conformado más recurrentes son el moldeado manual, el torno y el uso de moldes de escayola u otro material. En el moldeado manual, como lo indica su nombre, el artesano sólo se vale de sus manos, su destreza y uno que otro utensilio de apoyo. Por su parte el torno, que consta de una base giratoria (Figura 4), se emplea para la elaboración de piezas con sección circular, como tazas y jarras. En cambio, los moldes se emplean para fabricar platos al presionar una lámina de pasta cerámica sobre estos para transferir su forma, para luego cortar el excedente y añadir los accesorios.

Una vez conformada la pieza, ésta se seca para eliminar el agua libre que contenga, procurando que ésta se elimine de adentro hacia fuera para evitar complicaciones en el proceso de cocción. En este sentido, las arcillas pueden absorber entre el 15% al 50% de su peso en agua para formar una pasta plástica. Aunque durante el proceso de cocción sobran las condiciones para que toda el agua contenida en la pieza se elimine, si aún húmeda fuera llevada a cocción, el agua remanente se transformaría en vapor, de modo que la presión generada al interior provocaría que ésta se fracturara o incluso estallara.



Figura 4. Torno cerámico del Centro Comunitario “Metzontla, Alfarería y Ecoturismo”, Los Reyes Metzontla, Zapotitlán Salinas, Puebla.

Una vez conformada la pieza, ésta se seca para eliminar el agua libre que contenga, procurando que ésta se elimine de adentro hacia fuera para evitar complicaciones en el proceso de cocción. En este sentido, las arcillas pueden absorber entre el 15% al 50% de su peso en agua para formar una pasta plástica. Aunque durante el proceso de cocción sobran las condiciones para que toda el agua contenida en la pieza se elimine, si aún húmeda fuera llevada a cocción, el agua remanente se transformaría en vapor, de modo que la presión generada al interior provocaría que ésta se fracturara o incluso estallara.

A diferencia del sector industrial, en los talleres artesanales, el proceso de secado se realiza normalmente por convección natural en una habitación ventilada sin exposición directa a la luz solar. Esto hace que el tiempo de secado no sólo dependa de la granulometría de la materia prima, tamaño de la pieza y contenido de humedad, sino de las condiciones climáticas. El proceso de secado básicamente consiste en los siguientes fenómenos fisicoquímicos:

1. Se elimina el agua de los espacios entre partículas (agua de contracción). Las tensiones producidas entre las partículas por su eliminación hacen que éstas se aproximen, produciendo en una contracción apreciable de la pieza.

2. Se elimina la película de agua que envuelve a las partículas (agua de plasticidad). Las partículas se aproximan aún más entre sí, provocando una contracción adicional. La eliminación del velo de agua resulta en la pérdida de la plasticidad característica de la pasta.
3. Finalmente, se remueve el agua de absorción y capilaridad (agua de porosidad). Su desplazamiento entre las partículas hasta llegar a la superficie genera pequeños canales en la pieza.

El grado de contracción que presentan las piezas cerámicas durante el proceso de secado es de gran interés, particularmente cuando se hará un ensamble de piezas o cuando éstas forman parte de un conjunto. De los fenómenos descritos, se intuye que la contracción depende del contenido de humedad. Si bien, se puede estimar la contracción de una pieza conformada empleando calibres, ésta se puede cuantificar mediante el uso de probetas de estudio (Figura 5) (Scott, 2006). Éstas consisten en una placa de $12\text{ cm} \cdot 4\text{ cm} \cdot 1\text{ cm}$, a la cual se le marca una regleta de longitud d , generalmente de 10 cm. Una vez seca, se mide la distancia entre los extremos df , y se calcula el porcentaje de encogimiento $S\%$ mediante la siguiente ecuación:

$$S\% = \frac{d_i - d_f}{d_i} \times 100\% \quad (2)$$

En tanto que el contenido de humedad $M\%$ se determina por gravimetría, contrastando el peso inicial m_i y el final m_f , de acuerdo con la relación:

$$M\% = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100\% \quad (3)$$

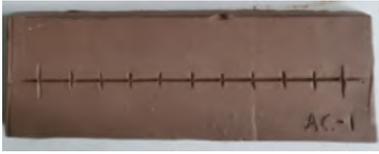


Figura 5. Probeta de para determinar el porcentaje de encogimiento de una pasta cerámica.

Posterior al proceso de secado sigue la cocción, que es sin duda el corazón de la elaboración de las cerámicas y es donde, por acción de la temperatura, la materia prima sufre transformaciones físicas y químicas, tales como cambios en su estructura cristalina, descomposición térmica, recombinación química, sinterización, entre otros (Figura 6). Así, en función de la temperatura, van sucediendo en el cuerpo cerámico las transformaciones que a continuación se describen (Chong Bejarano, 2016; Morales Gueto, 2005):

1. Desde el inicio del proceso y hasta los 100 °C se elimina la humedad residual que pudiera contener la pieza.
2. Alrededor de los 300 °C se inicia la combustión de la materia orgánica en una atmosfera oxidante como el aire.
3. Entre 400 °C y 700 °C, las arcillas pierden el agua de hidratación, que corresponde a las moléculas de agua alojadas en su estructura cristalina, resultando en aluminosilicatos deshidratados (como la mullita), mismos que posteriormente se disocian formando óxidos reactivos como alúmina y sílice libres.
4. Entre 600 °C y 900 °C se descomponen los carbonatos y sulfatos desprendiendo gases.
5. Por arriba de 700 °C se producen reacciones exotérmicas (desprenden calor), como la transformación de fase de la alúmina, su recombinación con sílice, álcalis, óxidos de hierro y otros compuestos para formar una variedad de silicatos, aluminatos y aluminosilicatos que constituirán a la pieza cerámica, confiriéndole su dureza y resistencia mecánica características.

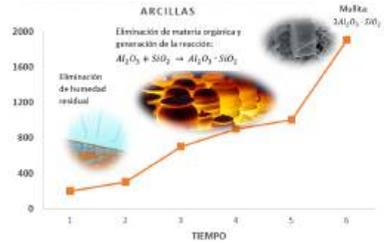


Figura 6. Perfil de temperatura típico de un proceso de cocción y procesos inducidos.

En este punto es importante mencionar, que la temperatura de cocción requerida para la consolidación de una pieza cerámica depende de la materia prima empleada. Por ejemplo, para la mayólica se usan temperaturas de entre 920 °C a 950 °C; la terracota requiere entre 900 °C a 1000°C; el gres fino, 1200 °C a 1280 °C; y la porcelana, 1350 °C a 1400 °C. En el caso del barro bruñido, la arcilla que se emplea para su fabricación es coloreada, obteniéndose cuerpos cerámicos de textura porosa, lo que corresponde a la clase terracota (Morales Gueto, 2005).

Tratamientos superficiales: el proceso de bruñido

Si bien, la materia prima con la que se fabrica una cerámica varía de región en región, es el tratamiento superficial quien brinda muchas veces el sello distintivo a cada estilo cerámico. Ejemplo de ello es el uso de esmaltes, barnices, engobes, texturas, colores, diseños decorativos, etc. Los tratamientos superficiales se aplican para mejorar la apariencia y/o la funcionalidad de las piezas cerámicas. Al respecto, los esmaltes y barnices se emplean para hacerlas impermeables, al tiempo de cambiar su apariencia externa.

La composición de los esmaltes y barnices es una mezcla de sílice y diferentes minerales conteniendo K, Al, Si, Na, Ca, Sn, e incluso Pb en distintas proporciones. Al aplicarlos sobre una pieza se forma una capa adherida débilmente al cuerpo cerámico. En ocasiones, para facilitar su aplicación se utilizan compuestos orgánicos como goma arábiga o carboximetilcelulosa que entran en combustión durante la cocción. La aplicación se puede efectuar por distintas técnicas, como la inmersión,

aspersión, pincel, pulverización o volatilización. Una vez aplicado, éste se somete a cocción a una temperatura que depende del punto de fusión del vidriado (esmalte), de modo que se obtenga una vitrificación completa y pueda extenderse por toda la pieza. Por ejemplo, los esmaltes utilizados para terracotas y faenza ocupan temperaturas de entre 900 °C a 1080 °C; para gres, temperaturas de 1250 °C a 1280 °C; y para porcelana, 1400 °C (Pradell y Molera, 2020).

Uno de los procesos más llamativos en el arte de alfarería es la técnica de bruñido. El objetivo de este proceso es dar lustre a la superficie de las piezas cerámicas, que le confieran un acabado estético

y sellen los poros del cuerpo cerámico, haciéndola más resistente y duradera (Valančius et al., 2024). Empleando esta técnica se pueden elaborar una variedad de objetos, desde vasijas, tazas, jarras hasta figuras decorativas alusivas a la vegetación local (Figura 7). Este proceso se realiza puliendo la pieza con un polvo abrasivo de color y herramientas u objetos conocidos como bruñidores, que pueden ser desde palos de madera, piedras, objetos de plástico, huesos o incluso semillas, dependiendo de la experiencia y gusto del alfarero. En el caso del barro bruñido se emplean polvos con alto contenido de óxido de hierro para pulir la pieza, dándole una apariencia lustrosa en tonalidades marrones.



Figura 7. Piezas cerámicas de barro bruñido elaboradas en Los Reyes Metzontla, Zapotitlan Salinas, Puebla.

Conclusiones

La fabricación de cerámica se basa en el aprovechamiento de las propiedades de la materia prima (arcilla y sílice) y su manipulación mediante la temperatura. En el sector artesanal, las técnicas empleadas son aprendidas, perfeccionadas y transmitidas de generación en generación, haciendo que las cerámicas estén impregnadas de la identidad de la comunidad que las produce. Durante el proceso de fabricación de una cerámica ocurren cambios físicos y químicos en los materiales empleados, como son transformaciones de fase, descomposición térmica, recombinación, sinterización, entre otros.

Asimismo, el resultado obtenido depende también de las características de la materia prima. Todos estos aspectos son manipulados de manera empírica por los artesanos, logando un control preciso en los diferentes procesos aún sin necesariamente conocer los principios y leyes que los gobiernan. Ejemplo de la maestría que han alcanzado los artesanos en el largo camino del método empírico son las piezas de barro bruñido elaboradas en Los Reyes Metzontla, Puebla, un estilo de cerámica de notable calidad y belleza, catalogada justamente como arte.

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.

Conflicto de interés

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

Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento otorgado por la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado (VIEP-BUAP) mediante el proyecto 100473300-VIEP2025. Hugo Daniel Ramírez Macín agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) la beca nacional otorgada para la realización de sus estudios de posgrado.

Referencias

- Andrade, F. A., Al-Qureshi, H. A. y Hotza, D. (2011). Measuring the plasticity of clays: A review. *Applied Clay Science*, 51(1–2), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.10.028>
- Callister, W. D., Jr. y Rethwisch, D. G. (2018). *Materials science and engineering: an introduction* (10ª ed.). Wiley.
- Carter, C. B. y Norton, M. G. (2013). *Ceramic Materials* (2nd ed.). Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3523-5>
- Cervantes, E. A. (1939). *Loza blanca y azulejo de Puebla*. Impresión privada.
- Chong Bejarano, K. A. (2016). Desgrasantes y cocción cerámica. *Boletín de Arqueología Experimental*, 9. <https://doi.org/10.15366/baexuam2012.9.008>
- Cuéllar Herrera, L. G., Raya Colín, J. A., Carrera-Figueiras, C. y Ortiz Landeros, J. (2023). Los materiales cerámicos: definición, clasificación y breve descripción de su estructura y propiedades. *Materiales Avanzados*, 3, 114–123. <https://doi.org/10.22201/iim.rma.2023.3.19>
- Domínguez Espinosa, A. V. (2016). Cambios en la alimentación de la cultura popoloca: comunidad San Juan Atzingo, Tehuacán, Puebla. Universidad Nacional Autónoma de México.
- El Periódico del Magisterio. (2005. 1 de octubre). Ganadores del Premio Nacional de Ciencias y Artes 2005. https://Www.Magisterio.Com.Mx/Archivo/2005/Octubre/Htm/Premio_nacional_2005.Htm.
- Kingery, W. D., Bowen, H. K. y Uhlmann, D. R. (1976). *Introduction to ceramics* (2ª ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Morales Gueto, J. (2005). *Tecnología de los Materiales Cerámicos*. Díaz de Santos.
- Morari Do Nascimento, G. (Ed.). (2021). *Clay and Clay Minerals*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.95640>

Pradell, T. y Molera, J. (2020). Ceramic technology. How to characterise ceramic glazes. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 12(8), 189. <https://doi.org/10.1007/s12520-020-01136-9>

Scott, M. (2006). *The Potter's Bible: An essential illustrated reference for both beginner and advanced potters*. Chartwell Books.

UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization). (2018, 2 de julio). Tehuacán-Cuicatlán Valley: originary habitat of Mesoamerica. <https://Whc.Unesco.Org/En/List/1534>.

Valančius, M., Vengalis, R. y Niedzielski, P. (2024). The unique aspects of the Burnished pottery of the pre-Roman & Roman periods in Lithuania: Study of ceramic technology and provenance in glacial-formed environment. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 57, 104582. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2024.104582>

CONEXIÓN ENTRE TRADICIÓN Y CIENCIA: EL POTENCIAL TERAPÉUTICO DE SOLANUM VIARUM EN IXTEPEC, PUEBLA

CONNECTION BETWEEN TRADITION AND SCIENCE: THE
THERAPEUTIC POTENTIAL OF SOLANUM VIARUM IN
IXTEPEC, PUEBLA

José Manuel Alonso Mora * 1
Fernando Gaona Márquez 1
Aleida Elizabeth Juárez Guzmán 2
Lizbeth Francisco Oropeza 2
Verna Cázares Ordoñez 3

- 1 Complejo Regional Nororiental de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- 2 Estudiantes del Bachillerato Tecnológico Agropecuario sede Ixtepec del Complejo Regional Nororiental de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- 3 Centro Universitario de la Salud del Complejo Regional Nororiental de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Correos:

manuel.alonsomora@correo.buap.mx*
fernando.gaona@correo.buap.mx
aleida.juarez@alumno.buap.mx
lizbeth.franciscoo@alumno.buap.mx
verna.cazares@correo.buap.mx

<https://orcid.org/0009-0002-9856-181X>
<https://orcid.org/0009-0006-7440-9900>
<https://orcid.org/0009-0008-7460-8680>
<https://orcid.org/0009-0005-5967-8363>
<https://orcid.org/0000-0003-3564-0369>

FOLIO: A11N100.25/1016

Resumen

El uso de plantas medicinales, vigente desde tiempos antiguos, sigue siendo relevante en todo el mundo. En México, esta práctica forma parte del patrimonio cultural, especialmente en zonas rurales donde la falta de servicios de salud impulsa el uso de remedios herbales. En Ixtepec, Puebla, se observa la integración de medicina tradicional y moderna. *Solanum viarum*, utilizada para afecciones gastrointestinales e inflamatorias, destaca por su potencial terapéutico. La investigación científica permitirá validar su seguridad y efectos, alineando el saber ancestral con la ciencia moderna para mejorar la salud comunitaria.

Palabras clave: *Solanum*, *Solanum viarum*; plantas medicinales; Ixtepec, Puebla; etnofarmacología.

Abstract

The use of medicinal plants, dating back to ancient times, remains vital worldwide. In Mexico, this tradition is a crucial part of cultural heritage, especially in rural areas where limited healthcare services drive communities to rely on herbal remedies. Ixtepec, Puebla, exemplifies the integration of traditional and modern medicine. Notably, *Solanum viarum*, a plant used locally for gastrointestinal and inflammatory conditions, presents therapeutic potential. Scientific research on this species is needed to validate its safety and pharmacological effects. Such studies align ancestral knowledge with modern science, fostering community health and education.

Keywords: *Solanum*, *Solanum viarum*; medicinal plants; Ixtepec, Puebla; ethnopharmacology.

Introducción

En México y en el mundo, el uso de las plantas medicinales se remonta a tiempos antiguos, en donde las diferentes culturas ocupaban estos productos con fines preventivos y curativos. El empleo y conocimiento sobre las propiedades de las plantas medicinales ha sido transmitido a las generaciones a través del tiempo hasta nuestros días (Bye, R., & Linares, E., 1999; Alonso-Castro, A. J., et al., 2016). Se denomina planta medicinal a aquellas especies vegetales que producen sustancias llamadas principios activos, las cuales tienen actividad farmacológica y son capaces de producir un efecto benéfico en algún tejido u órgano. Actualmente, se ha reportado que cerca del 30% de la población mundial aún utiliza plantas medicinales como remedios, incluso sin el conocimiento completo de las moléculas y los mecanismos responsables de los efectos a la salud humana. A pesar de que en tiempos antiguos el estudio de las plantas medicinales no se realizó con formalidad y bajo el rigor del método científico, a través del pensamiento racional se ha observado que las plantas poseen compuestos químicos los cuales a dosis apropiadas y con la correcta preparación, poseen efectos curativos. Esta observación ha permitido reconocer que dichos compuestos químicos se encuentran principalmente en hojas, seguido de las flores, tallo y finalmente raíz (Foresto, E., 2021; Hernández, B.C., 2013).

Uso de Plantas Medicinales en México

En México, el uso de plantas medicinales es parte integral del patrimonio cultural. Desde tiempos precolombinos, estas plantas han sido utilizadas para tratar infecciones sistémicas, heridas, quemaduras y cólicos menstruales (Martínez-Moreno et al., 2006). La transmisión del conocimiento herbolario ha pasado de generación en generación, especialmente en zonas rurales donde médicos tradicionales y curanderos preservan estos saberes ancestrales (Vargas-Vizuet et al., 2021). El Herbario Medicinal del IMSS reporta más de 3,000 plantas con uso medicinal en el país, tanto de origen endémico como europeo. Estas plantas juegan un papel esencial en más de 60 grupos étnicos del país, quienes recurren a terapias

alternativas debido a la inaccesibilidad de servicios de salud por razones económicas o geográficas (Velázquez-Vázquez et al., 2019). La mayor riqueza herbolaria se encuentra en la zona centro-sur del país, debido a la diversidad climática y de suelos que facilita el crecimiento de especies medicinales.

En este contexto, el estado de Puebla, particularmente en la región nororiental, destaca por la fuerte presencia de la medicina comunitaria. Los hospitales rurales, como el Hospital General de Cuetzalan y el Hospital Rural del IMSS en Ixtepec, han adoptado un modelo mixto que combina la biomedicina con la medicina tradicional, ofreciendo atención tanto técnica-científica como empírica a la población indígena (Duarte-Gómez et al., 2004).

La Integración de la Medicina Tradicional en Ixtepec, Puebla

El municipio de Ixtepec (Figura 1) ejemplifica un modelo significativo de integración entre la medicina tradicional y la ciencia moderna. En esta comunidad, la herbolaria ocupa un lugar central gracias a su población mayoritariamente indígena, donde más del 80% habla totonaco y mantiene vivos los conocimientos ancestrales sobre el uso de plantas medicinales para tratar diversas afecciones. La medicina tradicional en Ixtepec no es solo una expresión de identidad cultural, sino también una opción accesible para el cuidado de la salud, especialmente en un contexto donde los servicios médicos formales son limitados (Velázquez-Vázquez et al., 2019).

En Ixtepec, se emplea una amplia variedad de plantas medicinales, algunas de las cuales son estacionales, ya que su disponibilidad depende de los ciclos de floración. Sin embargo, una especie destaca por su abundancia en la región y su uso frecuente: *S. viarum*, conocida como manzana tropical. Esta planta es utilizada por curanderos locales para tratar diversas afecciones comunes, como problemas gastrointestinales, dolor abdominal, acné y fiebre. La alta frecuencia con la que la comunidad recurre a *S. viarum* refleja la

confianza en sus efectos terapéuticos, aunque los mecanismos bioquímicos que subyacen a su eficacia aún no han sido plenamente documentados.

Ante la escasez de información en las bases de datos científicas y considerando su relevancia en la medicina tradicional local, se llevó a cabo una revisión bibliográfica de esta especie. Los resultados muestran que *S. viarium* pertenece a un extenso grupo de plantas del género *Solanum*, conocido por sus propiedades anticancerígenas (Winkiel, M. J et al., 2022), antimicrobianas (Afroz, M. et al., 2020) y antioxidantes (Almoulah, N. F. et al., 2017). No obstante, esta especie en particular sigue siendo una de las menos exploradas dentro del género, lo que resalta la necesidad de investigaciones más profundas que permitan identificar sus principios activos y comprender mejor su potencial farmacológico.

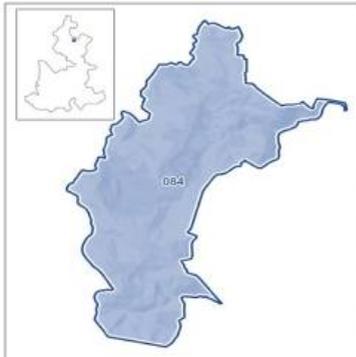


Figura 1. Ubicación del municipio de Ixtepec. Ixtepec se encuentra en la sierra nororiental del estado de Puebla, colinda con los municipios de Caxhuacan, Huehuetla, Zapotitlán de Méndez, Hueytlalpan y San Miguel Attequizayan.

Solanum

Solanum es uno de los géneros más grandes y diversos de la familia Solanaceae, con alrededor de 2000 especies distribuidas en regiones tropicales y subtropicales del mundo (Kaunda, J.S. & Zhang, YJ. 2019). Dentro de este género se encuentran plantas de gran relevancia económica y cultural (Figura 2), como el jitomate (*Solanum lycopersicum*), la berenjena (*Solanum melongena*) y la hierba mora (*Solanum nigrum*). Además de su

importancia alimentaria, muchas de estas especies han sido utilizadas en la medicina tradicional debido a la diversidad de su composición química donde se han identificado cerca de 670 compuestos bioactivos, como saponinas esteroidales, alcaloides, terpenos y flavonoides, con propiedades farmacológicas relevantes, como efectos anticancerígenos, antimicrobianos, antioxidantes y hepatoprotectores (Kaunda, J.S. & Zhang, YJ. 2019). A pesar de su potencial, algunas especies presentan toxicidad, lo que resalta la importancia de investigaciones adicionales para garantizar su seguridad.

Una de las especies del género *Solanum* que ha despertado gran interés en los últimos años es *Solanum nigrum*, conocida como hierba mora. Esta planta destaca no solo por su potencial como alimento, sino también por sus múltiples propiedades farmacológicas, las cuales han sido objeto de estudios recientes que buscan comprender sus mecanismos de acción y validar su aplicación en medicina moderna. Investigaciones recientes han identificado en *S. nigrum* una variedad de compuestos bioactivos, como saponinas esteroidales, alcaloides, flavonoides y polisacáridos. Estos compuestos presentan actividades antitumorales, antioxidantes, antiinflamatorias y antibacterianas tanto en estudios *in vitro* como *in vivo*, consolidando su potencial para el tratamiento de enfermedades complejas, incluyendo el cáncer y trastornos neurodegenerativos. Además, sus efectos neuroprotectores y hepatoprotectores sugieren posibles aplicaciones en la medicina funcional y en el desarrollo de nuevos fármacos basados en productos naturales (Chen, X. et al., 2022; Pandey, S., et al., 2018; Sharma D., et al., 2023). En la medicina tradicional china, *S. nigrum* se ha utilizado para tratar inflamaciones, infecciones urinarias, dermatitis y cáncer, y actualmente se emplea en combinación con otros remedios herbales para potenciar su efecto. La investigación contemporánea se enfoca en aislar los alcaloides esteroidales que contienen propiedades anticancerígenas y en analizar los posibles usos clínicos de estos compuestos, destacando su capacidad para reducir la toxicidad de tratamientos convencionales y mejorar la calidad de vida de los pacientes (Mei, Q. X. et al 2011).

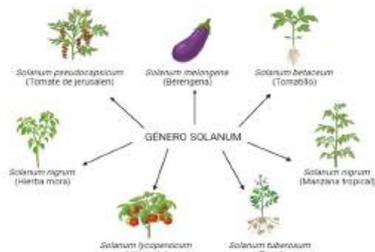


Figura 2. Principales especies del género *Solanum*.

El género *Solanum* está presente en diversas especies comestibles en México y el mundo.

Imagen elaborada en Biorender.

Solanum viarum

Solanum viarum es una planta nativa de América con amplia distribución en las regiones tropicales y subtropicales del continente. Tiene alta presencia en el sur de América, en países como Brasil, Argentina y Paraguay, y también en Centroamérica, especialmente en Cuba y Honduras. En Norteamérica, se ha reportado su crecimiento en el sur de Estados Unidos y en el centro y sur de México (Afonso et al., 2019; Qi et al., 2023). Desde el punto de vista económico, el impacto más notable de *S. viarum* se observa en la ganadería, ya que su crecimiento en áreas de pastoreo la convierte en una planta invasora que compite por los recursos del suelo, lo que reduce la disponibilidad de forraje natural para el ganado bovino.

La planta puede alcanzar hasta 1 metro de altura y presenta ramificaciones espinosas con hojas cuyas espinas llegan a medir hasta 4 cm de largo (Rodríguez-Toledo et al., s.f.). Sus frutos inmaduros tienen un color verde similar al de la sandía, mientras que los maduros adquieren un tono amarillo (Figura 3).

Las diversas partes de la planta, como raíz, tallo, hojas y frutos, contienen alcaloides con propiedades farmacológicas. Sin embargo, es en los frutos (Figura 4) donde se concentra la mayor cantidad de compuestos bioactivos (Thakur et al., 2024; Pandey et al., 2018; Saha, 2024). Entre los principales componentes se encuentran los derivados fenólicos del ácido cafeoilquinico, que han demostrado propiedades antioxidantes en diferentes modelos celulares y animales, y la solasodina, un precursor en la síntesis de esteroides, que ha sido ampliamente investigada por sus efectos anticancerígenos, citotóxicos, antiinflamatorios, antiproliferativos, anti-diabéticos y antimicrobianos (Figura 5) (Castillo et al., 2012; Crespo, 2015; Wu, 2012; Zhao et al., 2021; Prasad et al., 2019).

Dado su potencial terapéutico, los frutos de *S. viarum* representan un objetivo importante para futuras investigaciones orientadas a validar su bioseguridad y evaluar la toxicidad potencial en consumidores. La planta es abundante en el municipio de Ixtepec, particularmente



Figura 3: Anatomía general de *Solanum viarum*. Se observan las partes anatómicas básicas de la planta con particular énfasis en los frutos que cambian su aspecto de acuerdo con su maduración. Fotografías propias.

en las áreas del Bachillerato Tecnológico Agropecuario de la BUAP, donde crece en los campos de ganado, cultivos y áreas verdes. En estos entornos, actúa como planta competidora, evitando el crecimiento de malezas. Sin embargo, debido a las espinas y los efectos neurotóxicos que produce en mamíferos, se ha observado que el ganado evita su consumo.



Figura 4: Fruto de *Solanum viarum*. Se observa el mucílago y las semillas de la planta. Fotografías propias.

El uso tradicional de *S. viarum* en Ixtepec subraya la necesidad de investigar sus principios activos y entender sus mecanismos farmacológicos. La toxicidad es

un factor crucial, ya que los alcaloides esteroidales que contiene pueden generar efectos adversos sin un control adecuado. La variación en metabolitos, influenciada por la genética y el entorno, plantea desafíos para la estandarización (Patel et al., 2022).

Por otro lado, *S. nigrum* ha demostrado un perfil de seguridad más sólido tras estudios preclínicos, facilitando su uso terapéutico. La investigación científica en *S. viarum* podría impulsar terapias alternativas para la sierra nororiental de Puebla, donde los servicios de salud son limitados. Sin embargo, se requiere un enfoque riguroso en bioseguridad para su aplicación en humanos. En Ixtepec, el uso de *S. viarum* refleja cómo el conocimiento tradicional puede contribuir a resolver los desafíos de salud local, especialmente en comunidades con acceso limitado a servicios médicos. La investigación en esta planta abre oportunidades para desarrollar terapias alternativas basadas en productos naturales, alineando la ciencia moderna con los saberes ancestrales de los pueblos indígenas. Esta integración también tiene el potencial de fomentar la participación de instituciones educativas locales, como el Bachillerato Tecnológico Agropecuario de la BUAP, en proyectos de investigación aplicada que fortalezcan tanto la ciencia como el tejido social.

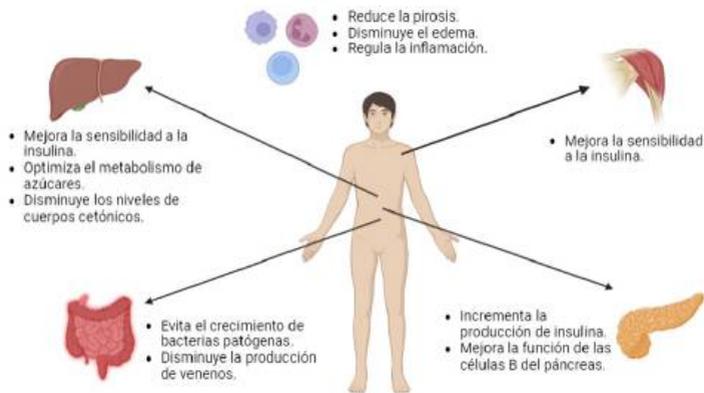


Figura 5. Potenciales terapéuticos de *Solanum viarum*. Principales efectos reportados en diferentes modelos experimentales. Imagen elaborada

Conclusiones

El uso de plantas medicinales ha sido una base fundamental del tratamiento farmacológico a lo largo de la historia, donde los principios activos derivados de estas han permitido el desarrollo de terapias efectivas. En la actualidad, la investigación farmacológica se enfoca en identificar interacciones precisas entre moléculas bioactivas y receptores celulares, mediante síntesis química o modificación de compuestos aislados de plantas. Aunque México ha adoptado ampliamente la medicina moderna, el uso de plantas medicinales sigue siendo una práctica común, especialmente en comunidades rurales.

En el estado de Puebla, particularmente en la sierra nororiental, las plantas medicinales forman parte integral de la vida cotidiana debido a su accesibilidad y simplicidad en la preparación para el tratamiento de enfermedades.

Sin embargo, para asegurar un uso seguro y eficaz de estas plantas, es esencial profundizar en su estudio y validar científicamente sus efectos terapéuticos.

Solanum viarum representa un caso de estudio que permite combinar el conocimiento ancestral con la ciencia moderna para ofrecer nuevas soluciones de salud. Estudiantes y comunidades pueden desempeñar un papel activo en esta investigación, contribuyendo al desarrollo de tratamientos innovadores. ¿Qué otras plantas medicinales conoces? ¿Qué impacto podrían tener en la medicina del futuro? Estas preguntas invitan a reflexionar sobre cómo el saber tradicional y la ciencia pueden trabajar juntos para enfrentar los desafíos de salud actuales y futuros.

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.

Conflicto de interés

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

Agradecimientos

Agradecemos a la BUAP y al Complejo Regional Nororiental por promover e incentivar la investigación y divulgación de la ciencia en estudiantes del Bachillerato Tecnológico Agropecuario del Complejo Regional Nororiental.

Referencias

- Afonso, T. F., Demarco, C. F., Pieniz, S., Camargo, F. A. O., Quadro, M. S., & Andrezza, R. (2019). Potential of *Solanum viarum* Dunal in use for phytoremediation of heavy metals to mining areas, southern Brazil. *Environmental Science And Pollution Research*, 26(23), 24132-24142. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05460-z>
- Afroz, M., Akter, S., Ahmed, A., Rouf, R., Shilpi, J. A., Tiralongo, E., Sarker, S. D., Göransson, U., & Uddin, S. J. (2020). Ethnobotany and Antimicrobial Peptides From Plants of the Solanaceae Family: An Update and Future Prospects. *Frontiers in pharmacology*, 11, 565. <https://doi.org/10.3389/fphar.2020.00565>
- Almoulah, N. F., Voynikov, Y., Gevrenova, R., Schohn, H., Tzanova, T., Yagi, S., Thomas, J., Mignard, B., Ahmed, A., Siddig, M. E., Spina, R., & Laurain-Mattar, D. (2017). Antibacterial, antiproliferative and antioxidant activity of leaf extracts of selected Solanaceae species. *South African Journal Of Botany*, 112, 368-374. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2017.06.016>
- Alonso-Castro, A. J., Domínguez, F., Maldonado-Miranda, J. J., Castillo-Pérez, L. J., Carranza-Álvarez, C., Solano, E., Isiordia-Espinoza, M. A., Del Carmen Juárez-Vázquez, M., Zapata-Morales, J. R., Argueta-Fuertes, M. A., Ruiz-Padilla, A. J., Solorio-Alvarado, C. R., Rangel-Velázquez, J. E., Ortiz-Andrade, R., González-Sánchez, I., Cruz-Jiménez, G., & Orozco-Castellanos, L. M. (2016). Use of medicinal plants by health professionals in Mexico. *Journal Of Ethnopharmacology*, 198, 81-86. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2016.12.038>
- Bye, R., & Linares, E. (1999). Plantas medicinales del México prehispánico. *Arqueología Mexicana*, 7(39), 4-13. <https://biblat.unam.mx/es/revista/arqueologia-mexicana/articulo/plantas-medicinales-del-mexico-prehispanico>
- Castillo, J., Hurtado, I. C., & Chamorro, A. (2012). Extracción y cuantificación del alcaloide esterooidal solasodina, de los frutos del *Solanum wrightii* Benth y el *Solanum pseudocapsicum* L. *Ingenium*, 6(13), 57. <https://doi.org/10.21774/ing.v6i13.88>

- Chen, J., Ma, D., Zeng, C., White, L. V., Zhang, H., Teng, Y., & Lan, P. (2022). Solasodine suppress MCF7 breast cancer stem-like cells via targeting Hedgehog/Gli1. *Phytomedicine*, 107, 154448. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2022.154448>
- Chen, X., Dai, X., Liu, Y., Yang, Y., Yuan, L., & Gong, G. (2022). *Solanum nigrum* Linn: An Insight into Current Research on Traditional Uses, Phytochemistry, and Pharmacology. *Frontiers In Pharmacology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fphar.2022.918071>
- Crespo, S. R. (2015). Efecto del ácido 3-cafeoilquínico en el volumen de infarto cerebral y en marcadores plasmáticos de estrés oxidativo en un modelo en animal experimental: desarrollo de un modelo para el estudio del estrés oxidativo en tejido cerebral infartado. <https://doi.org/10.36443/10259/5125>
- Delbrouck, J. A., Desgagné, M., Comeau, C., Bouarab, K., Malouin, F., & Boudreault, P. (2023). The Therapeutic Value of Solanum Steroidal (Glyco)Alkaloids: A 10-Year Comprehensive Review. *Molecules*, 28(13), 4957. <https://doi.org/10.3390/molecules28134957>
- Duarte-Gómez, M. B., Brachet-Márquez, V., Campos-Navarro, R., Nigenda, G. (2004). Políticas nacionales de salud y decisiones locales en México: el caso del Hospital Mixto de Cuetzalan, Puebla. *Salud Pública de México*, 46, 5.
- Foresto, E. (2021). Una farmacia en el monte. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 92(3), 16. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8098502>
- Hernández, B. C. R., Arellano, G. R., De Alba García, J. E. G., Hernández, J. Z., Rocha, A. L. S., & De Alba Verduzco, J. G. (2013). Conocimiento y uso de las plantas medicinales en la zona metropolitana de Guadalajara. *Desacatos*, 39, 29. <https://doi.org/10.29340/39.238>
- Kaunda, J.S., Zhang, YJ. The Genus Solanum: An Ethnopharmacological, Phytochemical and Biological Properties Review. *Nat. Prod. Bioprospect.* 9, 77–137 (2019). <https://doi.org/10.1007/s13659-019-0201-6>
- Martínez-Moreno, D., Alvarado-Flores, R., Mendoza-Cruz, M., & Basurto-Peña, F. (2006). Plantas medicinales de cuatro mercados del estado de Puebla, México. *Botanical Sciences*, 79, 79-87. <https://doi.org/10.17129/botsci.1735>

Mei, Q. X., Zhang, Z. Q., Lin, H., Guan, J., Jiang, Q. M., and Li, H. N. (2011). Research progress on the pharmacological effects and clinical application of *Solanum nigrum* in the treatment of tumors. *China Pharm.* 23 (39), 3735–3737. doi:10.6039/j.issn.1001-0408.2012.39.31

Ono, M., Kakiuchi, T., Ebisawa, H., Shiono, Y., Nakamura, T., Kai, T., Ikeda, T., Miyashita, H., Yoshimitsu, H., & Nohara, T. (2009). Steroidal Glycosides from the Fruits of *Solanum viarum*. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*, 57(6), 632–635. <https://doi.org/10.1248/cpb.57.632>

Pandey, S., Goel, R., Bhardwaj, A., Asif, M. H., Sawant, S. V., & Misra, P. (2018). Transcriptome analysis provides insight into prickle development and its link to defense and secondary metabolism in *Solanum viarum* Dunal. *Scientific Reports*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35304-8>

Patel, P., et al. (2022). Environmental modulation of secondary metabolites in *Solanum viarum* Dunal. *Environmental and Experimental Botany*, 194, 104686. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2021.104686

Prasad, A., Patel, P., Pandey, S., Niranjana, A., & Misra, P. (2019). Growth and alkaloid production along with expression profiles of biosynthetic pathway genes in two contrasting morphotypes of prickly and prickleless *Solanum viarum* Dunal. *PROTOPLASMA*, 257(2), 561-572. <https://doi.org/10.1007/s00709-019-01446-3>

Qi, Y., Xian, X., Zhao, H., Yang, M., Zhang, Y., Yu, W., & Liu, W. (2023). World Spread of Tropical Soda Apple (*Solanum viarum*) under Global Change: Historical Reconstruction, Niche Shift, and Potential Geographic Distribution. *Biology*, 12(9), 1179. <https://doi.org/10.3390/biology12091179>

Rodríguez-Toledo Y. F., et al. Primer reporte de *Solanum viarum* dunal en Cuba y nuevo reporte de *Amaranthus ssp* para la provincia de Sancti Spiritus, Cuba

Saha, M. (2024). Floral morphometrics, cytology and fruit biochemical studies in wild populations of *Solanum viarum* Dunal- an ethnomedicinal plant of North-East India. *Vegetos*. <https://doi.org/10.1007/s42535-024-00946-9>

- Sharma, D., Joshi, M., Apparsundaram, S., Goyal, R. K., Patel, B., & Dhobi, M. (2023). *Solanum nigrum* L. in COVID-19 and post-COVID complications: a propitious candidate. *Molecular And Cellular Biochemistry*, 478(10), 2221-2240. <https://doi.org/10.1007/s11010-022-04654-3>
- Shukla, P., Kidwai, M., Narayan, S., Shirke, P. A., Pandey, K. D., Misra, P., & Chakrabarty, D. (2023). Phytoremediation potential of *Solanum viarum* Dunal and functional aspects of their capitate glandular trichomes in lead, cadmium, and zinc detoxification. *Environmental Science And Pollution Research*, 30(14), 41878-41899. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25174-7>
- Thakur, M., Verma, R., Kumar, D., Das, P. P., Dhalaria, R., Kumar, A., Kuca, K., Azizov, S., & Kumar, D. (2024). Revisiting the ethnomedicinal, ethnopharmacological, phytoconstituents and phytoremediation of the plant *Solanum viarum* Dunal. *Naunyn-Schmiedeberg S Archives Of Pharmacology*. <https://doi.org/10.1007/s00210-024-03034-6>
- Vargas-Vizuet, A. L., Lobato-Tapia, C. A., Tobar-Reyes, J. R., La Cruz, M. T. S., Marinez, A. Y., & Fernandez, A. R. (2021). Medicinal plants used in the region of Teziutlán, Puebla, Mexico. *Boletín Latinoamericano Y Del Caribe De Plantas Medicinales Y Aromaticas*, 21(2), 224-241. <https://doi.org/10.37360/blacpma.22.21.2.14>
- Winkiel, M. J., Chowański, S., & Stocińska, M. (2022). Anti-cancer activity of glycoalkaloids from *Solanum* plants: A review. *Frontiers in pharmacology*, 13, 979451. <https://doi.org/10.3389/fphar.2022.979451>
- Wu, S., Meyer, R. S., Whitaker, B. D., Litt, A., & Kennelly, E. J. (2012). Antioxidant Glucosylated Caffeoylquinic Acid Derivatives in the Invasive Tropical Soda Apple, *Solanum viarum*. *Journal of Natural Products*, 75(12), 2246-2250. <https://doi.org/10.1021/np300553t>
- Velázquez-Vázquez, G., Pérez-Armendáriz, B., Ortega-Martínez, L. D., & Nelly-Juarez, Z. (2019). Conocimiento etnobotánico sobre el uso de plantas medicinales en la Sierra Negra de Puebla, México. *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromaticas*, 18(3), 265-276. <https://doi.org/10.37360/blacpma.19.18.3.17>
- Zhao, D., Zhao, Y., Chen, S., & Kennelly, E. J. (2021). *Solanum* steroidal glycoalkaloids: structural diversity, biological activities, and biosynthesis. *Natural Product Reports*, 38(8), 1423-1444. <https://doi.org/10.1039/d1np00001b>

FORMACIÓN DE PROFESORES DE INGLÉS EN MÉXICO: EL DESAFÍO DE LA LITERACIDAD ACADÉMICA

ENGLISH LANGUAGE TEACHERS' EDUCATION IN MEXICO:
THE CHALLENGE OF ACADEMIC LITERACY

Georgina Aguilar-González*
Eugenia Erica Vera Cervantes
Alfonso Cano Robles

Doctorado en Sistemas y Ambientes Educativos,
Facultad de Ciencias de la Electrónica.
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
Av. 18 sur y San Claudio S.N. Ciudad Universitaria, Col. San Manuel,
Puebla, Mx.

Correos:
ag223570456@alm.buap.mx
eugenia.vera@correo.buap.mx
alfonso.canorobles@viep.com.mx

<https://orcid.org/0000-0002-7639-9084>
<https://orcid.org/0000-0001-9297-4002>
<https://orcid.org/0000-0002-9496-2301>

Folio: A11N101.25/1017

ISSN 2448-5829

Año 11, No. 33, 2025, pp. 88-98

RD-ICUAP

Resumen

Este artículo de divulgación explora la importancia de desarrollar la literacidad académica en estudiantes mexicanos que se están formando como docentes de inglés. A partir de una distinción conceptual entre literacidad y alfabetización académica, se argumenta que, aunque a menudo se usan como sinónimos, estos términos remiten a prácticas distintas que conviene diferenciar. Se destaca que los futuros docentes deben no solo integrarse a comunidades académicas donde el inglés es lengua extranjera, sino también adquirir herramientas para acompañar a sus estudiantes en procesos de lectura y escritura en contextos disciplinares. Se plantea que fortalecer la literacidad académica implica revisar críticamente las prácticas actuales de alfabetización, desde un enfoque más situado, inclusivo y transformador. Además, se identifican algunos de los principales retos que enfrentan las instituciones formadoras, entre ellos el acceso crítico a la información, el ingreso a comunidades discursivas, el aprovechamiento de las tecnologías y la consolidación de una conciencia académica sobre el papel de la lectura y la escritura en la formación universitaria. En respuesta a estos desafíos, también busca fomentar la reflexión sobre las implicaciones pedagógicas de formar docentes con sólidas habilidades de alfabetización académica, que les permitan contribuir de manera significativa a la construcción del conocimiento académico disciplinar.

Palabras clave: literacidad académica, alfabetización académica, formación de profesores en inglés, desarrollo profesional.

Abstract

This article discusses the importance of developing academic literacy among Mexican students pursuing a degree in English language teaching. Based on a conceptual distinction between literacy and academic literacy, it is argued that although these terms are often used interchangeably, they refer to different practices. The article emphasizes the need for future teachers not only to participate in academic communities in English but also to acquire tools to support their own students in reading and writing processes in academic contexts. It suggests that strengthening academic literacy requires rethinking traditional approaches to academic writing and reading through a situated, critical, and disciplinary lens. Finally, the article analyzes the challenges faced by teacher education institutions in this process, especially given the current demands for publication and participation in international academic environments. In response to these challenges, it also seeks to encourage reflection on the pedagogical implications of preparing teachers with strong academic literacy skills, enabling them to make meaningful contributions to the construction of disciplinary academic knowledge.

Keywords: academic literacy, academic alphabetization, English language teacher education, professional development

La literacidad es un tema central en el ámbito educativo contemporáneo. Desde hace décadas, se considera un indicador clave del desarrollo humano, tal como lo reconocen los informes de Desarrollo Humano de las Naciones Unidas (Riquelme Arredondo y Quintero Corzo, 2017, p. 95). En la actualidad, los estudiantes de educación superior en México enfrentan crecientes exigencias para desarrollar habilidades de lectura y escritura académica tanto en español como en inglés. Esta demanda responde a una expectativa institucional: que participen activamente en publicaciones académicas, nacionales e internacionales, como parte de su formación profesional.

El desarrollo de la literacidad académica, así como la promoción de una adecuada alfabetización académica, es fundamental en cualquier disciplina. Sin embargo, esta necesidad se vuelve aún más apremiante en la formación de futuros profesores de inglés. A ellos se les exige no solo involucrarse en los debates de su propia área disciplinar, sino también adquirir competencias para formar a estudiantes universitarios de otras carreras que deberán insertarse en comunidades académicas y de investigación (Moore y Ruiz, 2016, p. 79). Como es bien sabido, el inglés ocupa un lugar predominante en la comunicación científica y académica a nivel global, y esta tendencia sigue en aumento.

Este artículo tiene como propósito informar y sensibilizar sobre la importancia del desarrollo de la literacidad académica en estudiantes que se están formando como docentes de inglés. En primer lugar, se propone una definición clara del concepto de literacidad académica, seguida de la distinción con el de alfabetización académica, dos términos que a menudo se usan como sinónimos, pero que implican prácticas diferentes. Una vez establecida esta diferencia, se examina por qué es crucial desarrollar la literacidad académica en la formación de futuros profesores de inglés como lengua extranjera. Finalmente, se abordan los principales retos que plantea una alfabetización académica adecuada para lograr ese desarrollo, con énfasis en

su impacto en la preparación profesional de estos docentes.

Literacidad académica

En el enfoque de los Nuevos Estudios de la Literacidad se ha ido desarrollando un área de investigación sobre literacidad académica que se dedica al estudio de la educación superior (Zavala, 2011). Este concepto se entiende como un conjunto de prácticas sociales desarrolladas y moldeadas dentro de la disciplina que muestran diferentes formas de relacionarse con los textos y en la construcción del conocimiento (Bertram, Johnson y Goldring, 2022; Lea y Street, 1998). En este sentido, el aprendizaje de la literacidad académica no se reduce a adquirir habilidades técnicas de lectura y escritura, sino que supone integrarse a las prácticas socioculturales letradas que implican ciertas formas de comunicación, pensamiento y conocimiento que caracterizan a cada comunidad disciplinar (Lillis y Scott, 2007). Por lo tanto, acceder al conocimiento universitario implica participar en prácticas discursivas propias de cada disciplina.

Estas prácticas, además, pueden ser complejas y variar significativamente incluso dentro de una misma área del saber. Por ello, la literacidad académica se considera un factor clave para el desempeño estudiantil en la universidad, y su desarrollo se ha convertido en una responsabilidad fundamental de las instituciones educativas (Thesen y van Pletzen, 2006). En este sentido, formar a los estudiantes para que naveguen y participen activamente en estas prácticas se vuelve indispensable para su éxito académico y profesional. Una vez delimitado este concepto, se presenta a continuación el de alfabetización académica, con el propósito de distinguir ambas nociones.

Alfabetización Académica

La alfabetización académica se concibe como “el proceso de enseñanza que puede (o no) facilitar el acceso de los estudiantes a las culturas escritas propias de cada disciplina” (Carlino, 2013, p. 370). A diferen-

cia de la literacidad, este concepto hace énfasis en el rol pedagógico y didáctico del profesorado, que mediante tareas guiadas promueve el desarrollo de habilidades de lectura y escritura contextualizadas en el campo disciplinar. Esta visión ha sido también respaldada por estudios como los de Paré y Smart (1994), quienes señalan que escribir en la universidad es aprender a participar en redes discursivas complejas donde el conocimiento se construye, no simplemente se reproduce.

La alfabetización académica implica dos objetivos fundamentales y estrechamente relacionados:

1. Enseñar a participar en los géneros propios de cada campo disciplinar, es decir, leer y escribir como lo hacen los especialistas.
2. Enseñar prácticas de estudio que permitan aprender en esa disciplina, lo cual implica leer y escribir para comprender el conocimiento existente y producir nuevo conocimiento (Carlino, 2013).

Desde esta perspectiva, el proceso de alfabetización académica se convierte en una tarea transversal que requiere una intervención sistemática desde todas las asignaturas, no únicamente desde las clases de lengua o comunicación escrita (Bazerman, 2009). El énfasis está en reconocer que leer y escribir en la universidad no es una habilidad previa, sino una práctica que se aprende en contexto, con acompañamiento docente (Tabla 1).

Tal como se señaló anteriormente, literacidad académica y alfabetización académica no son términos equivalentes. La primera puede entenderse como la meta formativa (participar activamente en las prácticas sociales y cognitivas de una comunidad académica), mientras que la segunda constituye el proceso pedagógico que permite alcanzarla (Carlino, 2013). Distinguir entre ambos conceptos no solo clarifica su alcance teórico, sino que permite articular dos campos de investigación y acción: la didáctica universitaria y la lingüística etnográfica (Carlino, 2013, p. 373). Esta distinción es fundamental para diseñar estrategias pedagógicas efectivas que respondan tanto a las necesidades de enseñanza como a la comprensión profunda de las prácticas literacitivas en contextos académicos diversos.

La importancia del desarrollo de la literacidad académica en la formación de profesores en la enseñanza del inglés

Como se mencionó anteriormente, el desarrollo de la literacidad académica y la promoción de una alfabetización académica adecuada son esenciales en cualquier disciplina. Sin embargo, esta necesidad es aún más apremiante en la formación de profesores en la enseñanza del inglés. A continuación, se presentan cuatro razones que sustentan esta afirmación.

En primer lugar, al igual que en otras carreras, los estudiantes que se forman como profesores de inglés deben leer, escribir y pensar críticamente para aprender y

Tabla 1. Comparación entre literacidad y alfabetización académicas.

	Literacidad Académica	Alfabetización Académica
Propósito	Participar activamente en las prácticas sociales y cognitivas de una comunidad académica	Promover la participación en las prácticas sociales y cognitivas de una comunidad académica, medida por estrategias pedagógicas que orientan el aprendizaje disciplinar.
Prácticas implicadas	Leer y escribir se desarrollan y moldean dentro de la disciplina	Leer y escribir se aprende en contexto con acompañamiento docente
Énfasis pedagógico	Implica modos específicos de comunicación, construcción del conocimiento y pensamiento que configuran la identidad discursiva de cada comunidad disciplinar.	Énfasis en el rol pedagógico y didáctico del profesor, que guía la participación en los géneros discursivos propios de cada campo disciplinar. Además, enseña prácticas de estudio que favorecen el aprendizaje situado dentro de la disciplina.
Campos de investigación y acción	Lingüística etnográfica	Didáctica universitaria

Nota. Elaboración propia para comparar ambos términos con base en los datos presentados en este artículo.

contribuir a la construcción del conocimiento en su disciplina. El desarrollo de sus habilidades cognitivas, investigativas, la comprensión profunda de su área de conocimiento y el uso adecuado del lenguaje (Paltridge, 2009; Hyland, 2004) son fundamentales en su formación profesional. Como señala Lillis (2001), escribir en la universidad no es solo una cuestión técnica, sino una práctica situada que requiere comprender las convenciones académicas propias de cada comunidad discursiva. Aquellos estudiantes que no desarrollan estas competencias enfrentan desventajas significativas, lo que podría generar un retroceso no solo en su formación profesional, sino también en los procesos educativos en los que participarán.

Segundo, para obtener su título profesional, estos estudiantes deben cumplir con un proceso de titulación que, en muchas universidades, implica la elaboración de textos académicos. Por ejemplo, en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), las modalidades de titulación incluyen opciones que requieren la presentación de trabajos escritos que demuestran un nivel adecuado de literacidad académica. La falta de dominio de estas habilidades, tanto en español como en inglés, puede dificultar la culminación de estudios y limitar las oportunidades de desarrollo profesional. En contextos latinoamericanos, autores como Carlino (2013) han mostrado cómo la escritura académica suele ser una fuente de exclusión si no se acompaña de una enseñanza explícita y sistemática. Así, la carencia de

literacidad académica en inglés podría incrementar el rezago estudiantil y retrasar el acceso a mejores condiciones laborales y educativas (Figura 1).

Tercero, los futuros profesores de inglés necesitan desarrollar la literacidad académica para participar activamente en el debate disciplinar (Moore y Ruiz, 2016), que implica acceder, producir y transformar conocimiento a través de diversos textos y géneros discursivos (Bazerman y Prior, 2005). También se espera que estos profesionales se capaciten continuamente, asistan a eventos académicos, investiguen y publiquen en inglés (León Izurieta et al., 2021), insertándose en la dinámica de la academia internacional. Como advierten Flowerdew (2015) y Canagarajah (2002), la participación en estos espacios no es neutral y requiere una alfabetización crítica que permita a los hablantes no nativos negociar las normas discursivas dominantes. Sin esta preparación, la mejora del sistema educativo en la enseñanza del inglés se vería limitada, ya que habría una escasa generación de propuestas y soluciones a los desafíos educativos actuales.

Por último, el desarrollo de la literacidad académica prepara a estos profesionistas para formar a estudiantes universitarios de otras disciplinas, facilitando su alfabetización académica en inglés. Esto les permite participar en procesos de divulgación, publicación y debate en sus respectivos campos. Los profesores de inglés, conscientes del contexto socio-



Figura 1. La literacidad académica y el desarrollo profesional docente

Nota. Es importante leer, escribir y pensar críticamente para la construcción del conocimiento disciplinar. <https://virtual.cuc.edu.co/blog/importancia-de-la-investigacion-en-la-universidad>

cultural de sus estudiantes, pueden responder eficazmente a las necesidades de aprendizaje y participación en sus áreas de estudio. Bajo este enfoque, el rol del profesor de inglés en la universidad es fundamental para la internacionalización de la producción académica y la apertura de un mercado laboral significativo (Moore y Ruiz, 2016). Sin una formación adecuada, estos futuros docentes estarían limitados para responder a las actuales demandas de participación académica de sus estudiantes (Figura 2).



Figura 2. La literacidad académica y el desarrollo profesional docente

Nota. Este diagrama representa las dimensiones clave que configuran el perfil de un docente de inglés comprometido con la literacidad académica. En el centro se sitúa la figura docente como agente activo, mientras que los cuatro nodos periféricos articulan sus prácticas fundamentales. Elaboración propia con base en los datos presentados en este artículo.

Los retos de la alfabetización académica en el desarrollo de la literacidad académica en la formación de profesores en la enseñanza del inglés

Reconocer la importancia de desarrollar la literacidad académica en futuros profesores de inglés nos permite identificar una serie de desafíos que enfrentamos quienes participamos en su formación. Estos retos se sitúan en el terreno de la alfabetización académica, entendida como el proceso pedagógico que permite la apropiación crítica y situada de las prácticas de lectura y escritura propias de una

comunidad académica. A continuación, se destacan algunos de los principales desafíos:

1. Acceso a la información y al conocimiento: El acceso masivo a información y recursos digitales, aunque constituye una ventaja significativa, también plantea retos cognitivos y pedagógicos. El exceso de información disponible, sumado a la falta de criterios para valorarla, puede dificultar los procesos de análisis, selección y producción de conocimiento entre los estudiantes (López, 2019). Esta sobrecarga informativa afecta tanto la comprensión lectora como la calidad de los textos académicos. Frente a ello, nuestro rol como formadores se transforma: más que transmisores de contenidos, debemos actuar como mediadores que guían a los estudiantes hacia una lectura crítica y una escritura reflexiva (Lea y Street, 1998; Carlino, 2013). Por ello, es imperativo diseñar estrategias pedagógicas que conviertan la abundancia informativa en una fuente de análisis crítico y desarrollo intelectual significativo.

2. Diseño de propuestas metodológicas que integren tecnología: Las prácticas de lectura y escritura han experimentado cambios profundos con la expansión de las tecnologías digitales, especialmente tras la pandemia de COVID-19. Esta transformación ha modificado no solo los formatos y medios, sino también los modos de acceso, procesamiento y producción de conocimiento (Kalantzis y Cope, 2012). En este nuevo contexto, es fundamental que como formadores diseñemos experiencias de lectura y escritura que incorporen la tecnología de manera crítica y significativa, fomentando aprendizajes profundos, pensamiento crítico y autonomía intelectual. No obstante, como advierten Sabines-Córdova et al. (2024), persiste una brecha entre el discurso normativo y las condiciones reales de implementación tecnológica en el ámbito educativo mexicano. Esta tensión nos interpela a construir propuestas que respondan al contexto digital sin perder de vista las limitaciones estructurales que lo atraviesan (Figura 3).

3. Ingreso a prácticas y comunidades discursivas: La incorporación de los estudiantes a las prácticas discursivas de su disciplina representa otro desafío importante. La complejidad de los géneros que demanda la profesión docente en inglés (ensayos académicos, reportes, planes de clase, entre otros) suele ser poco comprendida en los primeros años de formación. Como señala Swales (1990), ingresar a una comunidad discursiva implica no solo aprender a usar el lenguaje especializado, sino también a participar en formas particulares de construir y compartir conocimiento. Por ello, es clave acompañar a los estudiantes en este proceso de enculturación académica, favoreciendo el desarrollo progresivo de su autonomía.

4. Conciencia académica sobre la centralidad de la lectura y la escritura: Finalmente, es urgente consolidar entre la comunidad universitaria la idea de que la lectura y la escritura no son actividades instrumentales, sino prácticas centrales para la producción y validación del conocimiento. Como advierte López (2019), estas prácticas están directamente relacionadas con

la formación integral del profesorado, el desarrollo del pensamiento crítico y la generación de conocimiento situado. Promover esta conciencia supone crear comunidades de aprendizaje donde la lectura y la escritura sean ejes transversales, integrados en el currículo y vinculados a los contextos reales de la profesión docente (Figura 4).

En síntesis, los retos vinculados a la alfabetización académica en la formación de profesores de inglés son múltiples y complejos. No se limitan a la adquisición de habilidades técnicas de lectura y escritura, sino que involucran el acceso crítico a la información, la incorporación a comunidades discursivas, la apropiación de nuevas tecnologías y la consolidación de una conciencia académica que reconozca el valor formativo de estas prácticas. En contextos donde el inglés es una segunda lengua, estos desafíos se intensifican, pues implican no solo dominar el lenguaje académico, sino hacerlo en una lengua adicional.



Figura 3. Diseños tecno pedagógicos para el acceso al conocimiento e información

Nota. El acceso al conocimiento y la información a través del diseño de propuestas metodológicas que incorporan tecnología favorece el desarrollo de la literacidad académica en inglés. <https://juandomingofarnos.wordpress.com/2021/04/11/la-innovacion-tecnologica-amplia-el-acceso-al-conocimiento-y-el-aprendizaje-de-manera-critica-bajo-el-paraguas-de-la-transformacion-educacion-disruptiva/>

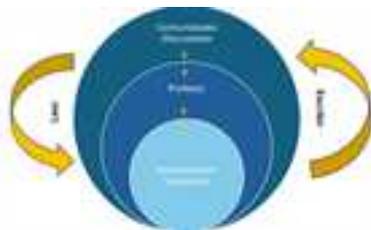


Figura 3. Diseños tecno pedagógicos para el acceso al conocimiento e información

Figura 4. Inserción del estudiante en formación en comunidades discursivas, acompañado por el docente en su proceso de alfabetización académica

Nota. Diagrama elaborado por la autora para representar los niveles de interacción en el proceso educativo desde una perspectiva discursiva. El estudiante en formación se sitúa en el núcleo de la práctica pedagógica, mediada por la figura docente y en diálogo con comunidades discursivas. Las acciones de leer y escribir se visualizan como vectores que articulan el tránsito entre la apropiación crítica del conocimiento y la producción situada de saberes.

Enfrentarlos requiere adoptar una mirada pedagógica más situada, crítica e inclusiva, que permita a los futuros docentes convertirse no solo en usuarios compe-

tentes del lenguaje académico en inglés, sino también en productores activos de conocimiento en dicha lengua.

Conclusión

La literacidad académica, entendida como una práctica social compleja y situada, constituye un eje fundamental en la formación de futuros docentes de inglés. Si bien su definición puede abordarse desde distintas dimensiones, reflexionar sobre ella nos permite delimitar un campo de acción pedagógica cada vez más relevante. En contextos donde el inglés se enseña como lengua extranjera, alfabetizar académicamente implica más que enseñar a leer y escribir: requiere formar lectores críticos y escritores capaces de participar activamente en las comu-

nidades discursivas de su disciplina. Reconocer los retos asociados al acceso a la información, el ingreso a prácticas académicas, el uso de tecnologías y la consolidación de una conciencia sobre la escritura como medio de producción de conocimiento, nos compromete como formadores a adoptar enfoques más críticos, inclusivos y situados. Solo así podremos contribuir a la formación de docentes que no solo dominen el lenguaje académico, sino que sean capaces de generar conocimiento desde su propia realidad.

Declaración de privacidad

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

Conflicto de interés

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

Agradecimientos

En primer lugar, se agradece el apoyo brindado al taller de Escribir para Divulgar, el cual propició las condiciones y motivación necesarias para la elaboración de este artículo. También se agradece el apoyo brindado por CONAHCYT y el Doctorado en Sistemas y Ambientes Educativos de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). Finalmente, se agradece a la Dra. Leticia Temoltzin Espejel de la Coordinación de escritura del centro de desarrollo internacional de la VIEP, BUAP por su retroalimentación en la edición de este artículo.

Referencias

- Bazerman, C., & Prior, P. (2005). What writing does and how it does it: An introduction to analyzing texts and textual practices. Lawrence Erlbaum.
- Bazerman, C. (2009). The informed writer: Using sources in the disciplines (3rd ed.). Wadsworth Cengage Learning.
- Bertram, C., et al. (2022). Using scaffolding academic literacy practices in tertiary classrooms: A South African case study. *Critical Studies in Teaching and Learning*, 10(1), 165-185. <https://www.ajol.info/index.php/cristal/article/view/240739>
- Carlino, P. (2013). Alfabetización académica diez años después. *Revista mexicana de investigación educativa*, 18(56), 355-381. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=s1405-66662013000200003
- Canagarajah, A. S. (2002). A geopolitics of academic writing. University of Pittsburgh Press.
- Flowerdew, J. (2015). John Swales's approach to pedagogy in academic writing. *Journal of English for Academic Purposes*, 19, 125-132.
- Hyland, K. (2004). *Disciplinary Discourses: Social Interactions in Academic Writing*. University of Michigan Press.
- Kalantzis, M., & Cope, B. (2012). *Literacies*. Cambridge University Press.
- Lea, M. R., & Street, B. V. (1998). Student writing in higher education: An academic literacies approach. *Studies in Higher Education*, 23(2), 157-172. <https://doi.org/10.1080/03075079812331380364>
- León Izurieta, L. A., Mocenchua Mora, D. & Cano Robles, A. (2021) Comunicación Pública de la Ciencia: Una habilidad urgente para los científicos. *RD-ICUAP*, 7 (21). Gracias, Gina. La referencia que compartiste está casi completa, pero puede beneficiarse de una pequeña corrección en el enlace y formato. Aquí te propongo una versión ajustada en estilo APA 7:
- León Izurieta, L. A., Mocenchua Mora, D., & Cano Robles, A. (2021). Comunicación pública de la ciencia: Una habilidad urgente para los científicos. *RD-ICUAP*, 7(21). <https://rd.buap.mx/ojs-rdicuap/index.php/rdicuap/article/download/629/843/1748>

- Lillis, T. (2001). *Student writing: Access, regulation, desire*. Routledge.
- Lillis, T., & Scott, M. (2007). Defining academic literacies research: Issues of epistemology, ideology and strategy. *Journal of Applied Linguistics*, 4(1), 5–32. <https://doi.org/10.1558/japl.v4i1.5>
- López, F. E. G. (2019). La lectura y la escritura en la universidad: Escenarios actuales, tendencias, retos e importancia en la generación de conocimiento y de una nueva cultura. Escuela Normal Oficial “Dora Madero”, Parras de la Fuente, Coahuila de Zaragoza, México. <https://www.researchgate.net/publication/331966305>
- Moore, P., & Ruíz, U. (2016). La alfabetización académica en la educación superior: el caso del inglés. En D. G. T Sarra-cino, M. D. S. M Rodríguez, & L. G. M. Escudero (Eds.), *Panoramas de la Enseñanza de Lenguas Extranjeras en México* (pp.77-97). Fenix.
- Paltridge, B. (2009). *Teaching academic writing: An introduction for teachers of second language writers*. University of Michigan Press.
- Paré, A., & Smart, G. (1994). *Writing in university: Education, knowledge and reputation*. Canadian Scholars' Press.
- Riquelme Arredondo, A., & Quintero Corzo, J. (2017). La literacidad, conceptualizaciones y perspectivas: hacia un estado del arte. *Revista reflexiones*, 96(2), 93-105.
- Sabines-Córdova, J., Cano-Robles, A., & Navarro-Rangel, Y. (2024). A la vanguardia de iure, a la retaguardia de facto: Integración de tecnologías en la educación. México.
- Revista Digital Internacional de Investigación Educativa RD ICUAP*, 10(28), 182–191. <https://rd.buap.mx/ojs-rdicuap/index.php/rdicuap/article/download/1242/1283/2516>
- Swales, J. M. (1990). *Genre analysis: English in academic and research settings*. Cambridge University Press.
- Thesen, L., & van Pletzen, E. (2006). *Academic literacy and the languages of change*. Continuum.
- Zavala, V. (2011). La escritura académica y la agencia de los sujetos. *Cuadernos Comillas*, 1(56), 52-66.

FORRAJES NO-CONVENCIONALES: RECURSOS VEGETALES CON GRAN POTENCIAL PARA LA GANADERÍA DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

NON-CONVENTIONAL FORAGES: PLANT RESOURCES WITH HIGH
POTENTIAL FOR LIVESTOCK PRODUCTION IN THE YUCATÁN
PENINSULA

Fernando Casanova-Lugo¹
Ricardo Lopes Dias da Costa²
Dixan Pozo-Leyva¹
José Escobedo-Mex³
Justo Ramón Enriquez-Nolasco^{4*}

¹Tecnológico Nacional de México campus I.T. de la Zona Maya,
Quintana Roo, México.

²Instituto de Zootecnia/Apta/SAA-SP, São Paulo, Brasil.

³Tecnológico Nacional de México campus I.T. de Conkal, Yucatán,
México.

⁴ El Colegio de la Frontera Sur - Unidad Villahermosa. 86280.
Carretera Villahermosa a Reforma Km 15.5, R/a Guineo 2da Sección.
Centro, Tabasco, México.

Correos:
fkzanov@gmail.com
rldcosta@sp.gov.br
dixan_pozo@yahoo.com
armando.ec@zonamaya.tecnm.mx
enriqznl@hotmail.com*

<https://orcid.org/0000-0003-2485-9170>
<https://orcid.org/0000-0001-8888-6915>
<https://orcid.org/0000-0002-3139-8512>
<https://orcid.org/0000-0002-4124-6184>
*<https://orcid.org/0000-0003-4498-6222>

FOLIO: A11N102.25/1018

Resumen

La península de Yucatán alberga una rica diversidad vegetal, incluyendo especies forrajeras no convencionales con alto potencial nutricional para la alimentación animal. Aunque poco aprovechadas en la ganadería comercial, estas plantas ofrecen ventajas ante la escasez de pastos y la baja fertilidad del suelo. Destacan leguminosas como *Leucaena leucocephala*, *Gliricidia sepium*, *Piscidia piscipula*, *Lysiloma latisiliquum* y *Clitoria ternatea*, así como especies no leguminosas como *Guazuma ulmifolia*, *Bursera simaruba*, *Tithonia diversifolia*, *Brosimum alicastrum*, *Hibiscus rosa-sinensis*, *Moringa oleifera* y *Morus alba*. Estas plantas presentan buena adaptación al clima regional y altos contenidos de proteína cruda (hasta 28.8%), con digestibilidades superiores al 60%, superando a muchos pastos tradicionales, especialmente durante la estación seca. Además, brindan beneficios agroecológicos como fijación de nitrógeno, provisión de sombra y mejoramiento del suelo. No obstante, para su aprovechamiento efectivo es necesario conocer su composición química y la presencia de compuestos antinutricionales, como los taninos. El Tecnológico Nacional de México, campus Zona Maya, ha realizado estudios bromatológicos que analizan fibra, cenizas, materia orgánica y digestibilidad. Aun así, se requiere más investigación sobre su manejo y conservación. Este trabajo respalda su uso racional para fomentar la autosuficiencia forrajera y una ganadería más sostenible en la región.

Palabras clave: Adaptación climática, especies nativas, sistemas sostenibles, valor nutricional.

Abstract

The Yucatán Peninsula harbors a rich plant diversity, including non-conventional forage species with high nutritional potential for animal feed. Although underutilized in commercial livestock production, these plants offer advantages in the face of pasture shortages and low soil fertility. Notable legumes include *Leucaena leucocephala*, *Gliricidia sepium*, *Piscidia piscipula*, *Lysiloma latisiliquum*, and *Clitoria ternatea*, as well as non-leguminous species such as *Guazuma ulmifolia*, *Bursera simaruba*, *Tithonia diversifolia*, *Brosimum alicastrum*, *Hibiscus rosa-sinensis*, *Moringa oleifera*, and *Morus alba*. These plants show good adaptation to the regional climate and contain high levels of crude protein (up to 28.8%), with digestibility values above 60%, outperforming many traditional grasses, especially during the dry season. Additionally, they offer agroecological benefits, including nitrogen fixation, shade provision, and soil improvement. However, effective utilization requires knowledge of their chemical composition and the presence of antinutritional compounds, such as tannins. The National Technological Institute of Mexico, Zona Maya campus, has conducted bromatological analyses evaluating fiber, ash, organic matter, and digestibility. Still, further research on their management and conservation is needed. This work supports their rational use to promote forage self-sufficiency and more sustainable livestock production in the region.

Keywords: Climate adaptation, native species, sustainable systems, nutritional value

Introducción

La península de Yucatán (PY), región ubicada en el sureste de México, se caracteriza por su biodiversidad y riqueza ecológica, incluye una amplia variedad de especies vegetales que han sido empleadas tradicionalmente en la alimentación animal. Entre estas especies, destacan aquellas consideradas no-conconvencionales, las cuales, a pesar de no ser ampliamente empleadas en sistemas ganaderos comerciales, poseen un potencial nutricional significativo para la dieta de los animales. Estas forrajeras no-conconvencionales representan una alternativa viable para mejorar la alimentación del ganado, especialmente en regiones donde los recursos forrajeros convencionales (i.e., pastos), son escasos o estacionales (Alavez López, 1983; Pozo-Leyva et al., 2024). El estudio de los atributos nutricionales de estas especies vegetales es fundamental para entender su contribución a la dieta de los rumiantes, ya que su composición química, digestibilidad (es decir, la facilidad con que los nutrientes de la planta pueden ser aprovechados por el animal) y contenido de nutrientes pueden variar considerablemente. Factores como el contenido de proteína cruda, fibra detergente neutro (FDN), fibra detergente ácido (FDA), lignina, y minerales son determinantes en la evaluación de su calidad nutricional. Además, la presencia de metabolitos secundarios (compuestos químicos que producen las plantas y que no son esenciales para su crecimiento, pero sí pueden influir en la digestión, como los taninos) puede influir en la digestibilidad y utilización de los nutrientes por parte de los animales (Ayala-Burgos et al., 2006).

En la PY, algunas especies vegetales no-conconvencionales han sido identifica-

das como potenciales recursos forrajeros entre las que destacan algunas leguminosas como: *Leucaena leucocephala*, *Gliricidia sepium*, *Piscidia piscipula*, *Lysiloma latisiliquum*, *Enterolobium cyclocarpum*, *Clitoria ternatea*, *Albizia lebbek*, y otras especies no-leguminosas como: *Guazuma ulmifolia*, *Brosimum alicastrum*, *Bursera simaruba*, *Tithonia diversifolia*, *Morus alba*, *Hibiscus rosa-sinensis* y *Moringa oleifera*, estas tres últimas originarias del continente Asiático, pero que se han introducido exitosamente a la PY (Moreno-Calles et al., 2013, Casanova-Lugo et al., 2025). Estas especies han demostrado adaptabilidad a las condiciones climáticas y edáficas de la región, lo que las convierte en alternativas prometedoras para la suplementación alimenticia en sistemas ganaderos sostenibles. Sin embargo, es necesario profundizar en el conocimiento de sus atributos nutricionales y antinutricionales (características de la planta que pueden favorecer o, en exceso, limitar la nutrición del animal) para optimizar su uso y garantizar una alimentación balanceada y eficiente para los rumiantes (Ayala-Burgos et al., 2006; Canul-Solís et al., 2020).

El presente trabajo tiene como objetivo analizar los principales atributos nutricionales de algunas especies forrajeras no-conconvencionales, destacando su composición química, digestibilidad y potencial impacto en la alimentación de rumiantes en la PY. Este análisis contribuirá a la generación de estrategias alimenticias que promuevan la sostenibilidad de los sistemas ganaderos en la región, reduciendo la dependencia de insumos externos y aprovechando los recursos locales disponibles.

Desarrollo

Los forrajes no-conconvencionales de la PY

En la PY, los sistemas ganaderos enfrentan desafíos como la variabilidad climática, la estacionalidad de los pastos y la baja fertilidad de los suelos, lo que ha impulsado la búsqueda de alternativas alimenticias más resilientes. En este contexto, los

forrajes no convencionales representan una opción clave para complementar la dieta del ganado (Moreno-Calles et al., 2014; Casanova-Lugo et al., 2025) y se distinguen por su capacidad de adaptación a suelos pobres y condiciones climáticas

extremas, lo que permite su aprovechamiento sin necesidad de insumos adicionales. Desde una perspectiva agroecológica, estas plantas no solo cumplen una función alimenticia, sino que también contribuyen a la sostenibilidad de los sistemas productivos. Su diversidad taxonómica (es decir, la clasificación de las especies de acuerdo a sus características biológicas) y funcionalidad ecológica contribuyen a la estabilidad de los ecosistemas agropecuarios, ofreciendo diversos beneficios como la fijación de nitrógeno en el suelo (en el caso de las leguminosas) y la provisión de sombra y materia orgánica a través de la caída de hojarasca (Casanova-Lugo et al., 2025).

El conocimiento empírico sobre el uso de estas especies ha sido transmitido por generaciones en comunidades rurales del sureste de México, donde tradicionalmente se han empleado como alimento complementario para rumiantes. En muchas localidades, este conocimiento convive con otras prácticas agrícolas tradicionales, como el cultivo y uso de especies de interés etnobotánico no forrajero, por ejemplo, el achiote (*Bixa orellana* L.), empleado ampliamente como colorante y condimento. Aunque el achiote no se considera una especie forrajera, su cultivo refleja la riqueza de saberes locales y el manejo de múltiples recursos vegetales con distintos fines (Figura 1). Sin embargo, la integración de estos forrajes en sistemas de producción ganadera a mayor escala requiere estudios detallados sobre su valor nutricional, métodos de conservación y formas de suplementación óptimas. A pesar de su potencial, es importante considerar que algunos de estos forrajes contienen diversos compuestos que pueden afectar la digestibilidad y el metabolismo del ganado si no se administran adecuadamente. Por ello, la investigación científica desempeña un papel clave en la identificación de estrategias que maximicen sus beneficios y minimicen sus limitaciones.



Figura 1. Mujer local retirando las semillas de *Bixa orellana* L. (achiote) utilizadas en la preparación de marquetas de condimento, ejemplo del conocimiento etnobotánico en la región. Fotografía: Justo R. Enríquez-Nolasco.

El Tecnológico Nacional de México (TecNM) campus IT de la Zona Maya (Quintana Roo) ha contribuido a la caracterización nutricional de diversas especies empleadas en la alimentación de rumiantes a través del Laboratorio de Estudios Avanzados en Agroecosistemas. Entre las especies forrajeras no-convencionales que han sido analizadas y estudiadas se encuentran: *Bauhinia alicastrum*, *Bursera simaruba*, *Clitoria ternatea*, *Gliricidia sepium*, *Guazuma ulmifolia*, *Hibiscus rosa-sinensis*, *Leucaena leucocephala*, *Lysiloma latisiliquum*, *Moringa alba*, *Moringa oleifera*, *Piscidia piscipula* y *Tithonia diversifolia* (Figura 2), y sus características botánicas generales se describen en la Tabla 1, de acuerdo a la Flora digital del CICY (https://www.cicy.mx/sitios/flora%20digital) y Flora Mesoamericana (http://legacy.tropicos.org/Project/FM).



Figura 2. Representación de las especies forrajeras no convencionales utilizadas en la alimentación de rumiantes en la península de Yucatán., a: *Bursera simaruba* (L.) Sarg, b: *Gliricidia sepium* (Jacq.) Kunth ex Walp, c: *Guazuma ulmifolia* Lam, d: *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit, e: *Lysiloma latisiliquum* (L.) Benth, f: *Moringa oleifera* Lam, g: *Piscidia piscipula* (L.) Sarg, h: *Tithonia diversifolia*

Tabla 1. Características botánicas generales de algunas especies no-convencionales utilizadas en la alimentación de rumiantes en la península de Yucatán. Origen biogeográfico en la PY: NA, nativa; CU, cultivado. Tipo de hábito: AR, Árbol; AB, Arbusto. Fuente: Elaboración propia

Familia botánica	Nombre científico	Nombre en español	Nombre maya	Origen biogeográfico en la PY	Tipo de hábito
Asteraceae	<i>Tithonia diversifolia</i> (Hemsl.) A. Gray.	Árnica	Su'um, su'un k'aak	NA, CU	AR
Burseraceae	<i>Bursera simaruba</i> (L.) Sarg.	Palo mulato	Chakaj	NA	AB
Fabaceae	<i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit.	Tumbapelo	Waaxim	NA, CU	AR
Fabaceae	<i>Clitoria ternatea</i> L.	Campanita azul	-	NA, CU	AB
Fabaceae	<i>Piscidia piscipula</i> (L.) Sarg.	Jabín	Ja'abin	NA	AR
Fabaceae	<i>Gliricidia sepium</i> (Jacq.) Kunth ex Walp.	Madre cacao	Sak-yab	NA, CU	AR
Fabaceae	<i>Lysiloma latisiliquum</i> (L.) Benth.	Tzalam	tsalam	NA	AR
Malvaceae	<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	Guásimo	pixoy	NA	AR
Malvaceae	<i>Hibiscus rosa-sinensis</i> L.	Tulipan	-	CU	AB
Moraceae	<i>Morus alba</i> L.	Morera	-	CU	AR
Moraceae	<i>Brosimum alicastrum</i> Sw.	Ramón	k'an oox	NA	AR
Moringaceae	<i>Moringa oleifera</i> Lam.	Moringa	-	CU	AR

En la mayoría de los casos, la calidad de la biomasa comestible de las especies forrajeras no-convencionales supera a la calidad de los pastos tradicionales.

Tabla 2. Contenidos (%) de proteína cruda (PC), fibra detergente neutro (FDN), fibra detergente ácido (FDA), cenizas (Cen), materia orgánica (MO), y digestibilidad de la materia seca (DMS, %), de algunas especies forrajeras no-convencionales utilizadas en la alimentación de rumiantes en la península de Yucatán. Material analizado: Hojas (H) y Tallos tiernos (Tt).

Especies	Material	PC	FDN	FDA	Cen	MO	DMS
<i>T. diversifolia</i>	H + Tt	21.4	44.3	26.6	13.3	83.7	68.2
<i>B. simaruba</i>	H	10.3	51.3	32.2	10.1	86.9	63.8
<i>L. leucocephala</i>	H + Tt	22.8	44.8	28.4	7.7	90.3	66.8
<i>C. ternatea</i>	H + Tt	14.7	52.8	37.1	6.0	91.0	60.0
<i>P. piscipula</i>	H	15.6	41.5	30.2	10.4	85.8	65.3
<i>G. sepium</i>	H	16.3	44.7	29.9	6.6	88.4	65.6
<i>L. latisiliquum</i>	H	16.2	45.7	28.6	13.6	82.9	66.6
<i>G. ulmifolia</i>	H + Tt	13.6	45.3	29.5	9.0	88.0	65.9
<i>H. rosa-sinensis</i>	H	14.7	46.4	30.2	8.7	85.9	65.4
<i>M. alba</i>	H + Tt	12.0	44.9	28.5	9.8	90.2	66.7
<i>B. alicastrum</i>	H	14.6	40.7	28.5	14.3	85.6	67.5
<i>M. oleifera</i>	H	18.1	42.0	24.4	8.9	87.7	69.8

Además, estas especies mantienen su calidad durante la estación seca, cuando los pastos muestran una limitada disponibilidad y baja calidad (Casanova-Lugo et al., 2014). De hecho, algunas especies pueden alcanzar o superar la calidad de los concentrados comerciales, lo que demuestra su potencial en la alimentación animal (Pozo-Leyva et al., 2024). Al respecto, especies de leguminosas como *L. leucocephala*, *C. ternatea*, *P. piscipula*, *G. sepium* y *L. latisiliquum*, generalmente poseen altos contenidos de proteína que van de 14.7 a 28.8%; digestibilidades que oscilan de 60 a 66.8%, entre otros atributos nutricionales. No obs-

tante, las especies no-leguminosas también mantienen excelentes concentraciones de proteína que van de 10.3 a 21.4 % y digestibilidades que oscilan de 63.8 a 69.8 % (Tabla 2). A pesar de lo anterior, es importante reconocer que la composición bromatológica de estas especies está influenciada por el tipo de material (i.e., hojas, tallos tiernos o una combinación de ambas fracciones comestibles), el manejo agronómico, la edad de la planta, el tipo de suelo, el clima, entre otros factores.

Avances en materia de investigación

En el TecNM se ha estudiado el comportamiento agronómico de estas especies forrajeras no-conventionales de gran potencial en la PY (Figura 3). Por ejemplo, se han establecido diversas parcelas experimentales en Yucatán y Quintana Roo con la finalidad de definir densidades de siembra, alturas de cosecha e intervalos de cosecha óptimos para el manejo sostenido de la producción de dichos recursos forrajeros con excelentes resultados (Casanova-Lugo et al., 2018; Ramos-Trejo et al., 2020; Uu-Espens et al., 2022). Asimismo, se ha evaluado la respuesta productiva de dichas especies en diferentes épocas del año, bajo distintas condiciones edáficas y en combinaciones con gramíneas en sistemas silvopastoriles (Toledo & Barrera-Bassols, 2008; Casanova-Lugo et al., 2014; Villanueva-Partida et al., 2019; Uu-Espens et al., 2022). También, se ha evaluado la inclusión de algunas especies forrajeras no-conventionales como parte de las dietas de rumiantes sobre la ganancia diaria de peso en rumiantes, la producción y calidad de leche en bovinos criollos y la reducción de las emisiones de metano al ambiente con alentadores hallazgos (Villanueva-Partida et al., 2019; Pozo-Leyva et al., 2024).



Figura 3. Especies forrajeras no-conventionales cultivadas en la península de Yucatán. *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit (a), *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A. Gray (b), *Morus alba* L. (c), *Clitoria ternatea* L.(d), *Moringa oleifera* Lam. (e) en bancos de forraje, y pasturas en callejones de *L. leucocephala* (f). Fotografías: Fernando Casanova-Lugo

A pesar de lo anterior, se ha señalado que estas especies poseen diversos compuestos anti-nutricionales, producto de su metabolismo secundario, que podrían ocasionar efectos negativos en el comportamiento productivo de los animales (Canul-Solís et al., 2020). Por ejemplo, se ha observado una reducción en el consumo de materia seca de los animales debido a la presencia de taninos condensados en la biomasa comestible de la mayoría de las especies forrajeras no-conventionales (Piñeiro-Vázquez et al., 2018). Además, el consumo frecuente de estos forrajes no-conventionales con altas concentraciones de taninos puede generar cambios en las poblaciones de microorganismos del rumen, limitando la absorción de nutrientes (Canul-Solís et al., 2020). A pesar de lo anterior, investigaciones recientes han demostrado que algunos metabolitos como los taninos y las saponinas (compuestos vegetales que producen espuma al contacto con agua y que también influyen en la digestión) tienen el potencial de reducir las emisiones de metano entérico (gas producido durante la digestión del ganado, con fuerte impacto ambiental) en rumiantes (Piñeiro-Vázquez et al., 2018)

Como es bien sabido, el metano tiene un potencial de calentamiento global 23 veces mayor que el dióxido de carbono y representa una pérdida del 5 al 18% de energía bruta consumida por rumiantes. Sin embargo, esta proporción podría ser más alta en animales alimentados con dietas de baja calidad, como es el caso de la PY, donde la mayoría de las unidades de producción animal dependen en gran medida de los pastos (Pozo-Leyva et al., 2024). Los metabolitos secundarios están presentes en el follaje y frutos de las especies forrajeras no-conventionales, tales como *G. sepium* y *E. cyclocarpum*, *L. leucocephala*, *L. latisiliquum*, por mencionar algunas (Nair et al., 2010; Piñeiro-Vázquez et al., 2018)

Finalmente, será importante plantear estudios que demuestran el potencial productivo de las especies forrajeras no-convencionales a largo plazo, la caracterización cuantitativa de los metabolitos

secundarios y su potencial en la mitigación de gases efecto invernadero bajo las condiciones edafoclimáticas de la PY.

Consideraciones finales

Las especies forrajeras no-convencionales representan un recurso valioso y poco explotado en los sistemas ganaderos comerciales de la PY. Su adaptabilidad a las condiciones climáticas y edáficas de la región las convierte en una alternativa viable para mejorar la producción animal, especialmente en zonas con limitaciones para el cultivo de forrajes tradicionales. Además, la incorporación de estas especies en los sistemas de producción animal puede aumentar la diversidad de la dieta del ganado, mejorar la resiliencia de los

sistemas agropecuarios frente a cambios climáticos y reducir la dependencia de insumos externos, como alimentos concentrados. El uso de especies forrajeras no-convencionales puede contribuir a la conservación del suelo, la reducción de la deforestación y la mitigación del cambio climático, ya que muchas de estas especies son tolerantes a condiciones adversas y requieren menos recursos hídricos e insumos químicos.

Conclusión

En la actualidad, la adopción de estas especies enfrenta serios desafíos, como la falta de conocimiento técnico, la escasa disponibilidad de semillas o material vegetativo y la resistencia al cambio por parte de los productores. Por lo que es necesario realizar programas de capacitación y difusión para promover su uso generalizado. Asimismo, se requiere mayor investigación para caracterizar estas especies, evaluar su valor nutricional, establecer prácticas de manejo adecuadas y desarrollar tecnologías para su cultivo y conservación. En este sentido, la colaboración entre

instituciones académicas, gobiernos y productores será clave para llevar a buen puerto la adopción de estas especies.

En conclusión, las especies forrajeras no-convencionales representan una gran oportunidad para fortalecer la producción animal en la PY, siempre y cuando se consideren los desafíos técnicos, sociales y económicos que limitan su adopción. Su aprovechamiento responsable puede contribuir a la seguridad alimentaria, la sostenibilidad ambiental y el desarrollo económico de la región.

Declaración de privacidad

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

Declaración de no conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de interés alguno

Agradecimientos

Se agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada para estudios de posgrado (Convocatoria Becas Nacionales 2025-2) del quinto autor.

Los autores manifestamos nuestro agradecimiento al Tecnológico Nacional de México (TecNM), campus IT de la Zona Maya, por las facilidades brindadas para el uso de las instalaciones y equipos del Laboratorio de Estudios Avanzados en Agroecosistemas. Asimismo, al TecNM por el financiamiento al proyecto "Sistemas agroforestales tradicionales y sus servicios ecosistémicos en el sureste de México (Clave: 22856.25-P)". También agradecemos a la Ing. Elda Carolina Yam Chalé, por el apoyo técnico en la elaboración de los análisis bromatológicos.

Referencias

- Álavez López, S. (1983). Estudio preliminar de los cercos vivos en la ganadería de Teapa, Tabasco: Manejo de árboles en los potreros, una técnica silvopastoril (Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Bosques).
- Ayala-Burgos, A., Cetina-Góngora, R., Capetillo-Leal, C., Zapata-Campos, C., & Sandoval-Castro, C. (2006). Composición química-nutricional de árboles forrajeros (56 pp.). Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. https://www.researchgate.net/publication/277141987_Composicion_Quimica_Nutricional_de_Arboles_Forrajeros.
- Canul-Solís, J., Campos-Navarrete, M., Piñeiro-Vázquez, A., Casanova-Lugo, F., Barros-Rodríguez, M., Chay-Canul, A., Cárdenas-Medina, J., & Castillo-Sánchez, L. (2020). Mitigation of rumen methane emissions with foliage and pods of tropical trees. *Animals*, 10(5), 843. <https://doi.org/10.3390/ani10050843>
- Casanova-Lugo, F., Petit-Aldana, J., Solorio-Sánchez, F.J., Parsons, D., & Ramírez-Avilés, L. (2014). Forage yield and quality of *Leucaena leucocephala* and *Guazuma ulmifolia* in mixed and pure fodder banks systems in Yucatan, Mexico. *Agroforestry Systems*, 88, 29-39. <https://doi.org/10.1007/s10457-013-9652-7>
- Casanova, F., Cetzal, W., Díaz, V., Chay, A., Oros, I., Piñeiro, A., & González, N. (2018). *Moringa oleifera* Lam. (Moringaceae): Árbol exótico con gran potencial para la ganadería ecológica en el trópico. *Agroproductividad*, 11(2), 100-105.
- Casanova-Lugo, F., Gutiérrez-López, A., Jiménez-Hernández, H., Quezada-Raya, G., Enríquez-Nolasco, J., & Cetzal-Ix, W. (2025). Especies arbóreas forrajeras de la península de Yucatán: una opción para diversificar los agroecosistemas. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 12(1), <https://doi.org/10.19136/era.a12n1.4138>
- Moreno-Calles, A. I., Toledo, V. M., & Casas, A. 2013. Los sistemas agroforestales tradicionales de México: Una aproximación biocultural. *Botanical Sciences*, 91(4), 375-398. <https://doi.org/10.17129/botsoci.419>.

Moreno-Calles, A. I., Galicia-Luna, V. J., Casas, A., Toledo, V. M., Vallejo-Ramos, M., Santos-Fita, D., Camou-Guerrero, A., & López-Martínez, W. (2014). Etnoagroforestería: el estudio de los sistemas agroforestales tradicionales de México. *Etnobiología*, 12(3). Recuperado de <https://www.revistaetnobiologia.mx/index.php/etno/article/view/167>.

Nair, P.R., Mohan Kumar, B., & Nair, V. D. 2009. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of plant nutrition and soil science*, 172(1), 10-23. <https://doi.org/10.1002/jpln.200800030>

Piñeiro-Vázquez, A.T., Canul-Solís, J.R., Jiménez-Ferrer, G.O., Alayón-Gamboa, J.A., Chay-Canul, A.J., Ayala-Burgos, A.J., Aguilar-Pérez, C.F., & Ku-Vera, J.C. (2018). Effect of condensed tannins from *Leucaena leucocephala* on rumen fermentation, methane production and population of rumen protozoa in heifers fed low-quality forage. *Asian-Australasian Journal of Animal Science*, 31(11), 1738-1746. doi: 10.5713/ajas.17.0192.

Pozo-Leyva, D., Casanova-Lugo, F., López-González, F., Celis-Álvarez M. D., Cruz-Tamayo A. A., Canul-Solis, J. R., & Chay-Canul, A. J. (2024) Impact of diversified grazing systems on milk production, nutrient use and enteric methane emissions in dual-purpose cows. *Tropical Animal Health and Production*, 56, 140. <https://doi.org/10.1007/s11250-024-03989-x>

Ramos-Trejo, O. S., Canul-Solís, J. R., Alvarado-Canché, A., Castillo-Sánchez, L. E., Sandoval-Gío, J. J., Campos-Navarrete, M. J., Piñeiro-Vázquez, A. T., Chay-Canul, A. J., & Casanova-Lugo, F. (2020) Growth, forage yield and quality of *Morus alba* L. and *Gliricidia sepium* (Jacq.) Walp. in mixed and pure fodder bank systems in Yucatan, Mexico. *Agroforestry Systems*, 94, 151-157. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00378-4>

Uu-Espens, C., Canul-Solís, J. R., Chay-Canul, A. J., Piñeiro-Vázquez, Á. T., Villanueva-López, G., Aryal, D. R., Pozo-Leyva, D., & Casanova-Lugo, F. (2022). Seasonal variation in biomass yield and quality of *Tithonia diversifolia* at different cutting heights. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 9(3), e3252. <https://doi.org/10.19136/era.a9n3.3252>

Villanueva-Partida, C. R., Díaz-Echeverría, V. F., Chay-Canul, A. J., Ramírez-Avilés, L., Casanova-Lugo, F., & Oros-Ortega, I. (2019). Comportamiento productivo e ingestivo de ovinos en crecimiento en sistemas silvopastoriles y de engorda en confinamiento. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 10(4), 870-884. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v10i4.4724>

Toledo, V. M., & Barrera-Bassols, N. 2008. La memoria biocultural: la importancia ecológica de las sabidurías tradicionales. Icaria Editorial. *Perspectivas Agroecológicas*, Barcelona, España

Villanueva-Partida, C. R., Díaz-Echeverría, V. F., Chay-Canul, A. J., Ramírez-Avilés, L., Casanova-Lugo, F., & Oros-Ortega, I. (2019). Comportamiento productivo e ingestivo de ovinos en crecimiento en sistemas silvopastoriles y de engorda en confinamiento. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 10(4), 870-884. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v10i4.4724>

Toledo, V. M., & Barrera-Bassols, N. 2008. La memoria biocultural: la importancia ecológica de las sabidurías tradicionales. Icaria Editorial. *Perspectivas Agroecológicas*, Barcelona, España

GRAFENO: UNO DE LOS MATERIALES MÁS VERSÁTILES EN LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA

GRAPHENE: ONE OF THE MOST VERSATILE MATERIALS
IN SCIENCE AND TECHNOLOGY

Nayeli Colin Becerril*
Ángel Leonardo Martínez López
Julio Gregorio Mendoza Álvarez
José Luis Herrera Pérez
Yenny Lucero Casallas Moreno

Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y
Tecnologías. Programa de Doctorado en Nanociencias y
Nanotecnología. Departamento de Física.
Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y
Tecnologías Avanzadas.
SECIHTI, Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería
y Tecnologías Avanzadas.
Instituto Politécnico Nacional, C.P. 07360, Ciudad de
México, México.

Correos:

ncolinc2200@alumno.ipn.mx
angel.martinezlpz@cinvestav.mx
julio.mendoza@cinvestav.mx
jherrerap@ipn.mx
ycasallasm@ipn.mx

<https://orcid.org/0009-0003-4639-8042>
<https://orcid.org/0000-0002-8987-8092>
<https://orcid.org/0000-0002-1325-6465>
<https://orcid.org/0000-0003-3978-3965>
<https://orcid.org/0000-0001-7998-2067> Año 11 No. 32

Resumen

El grafeno, una lámina bidimensional (2D) compuesta por una única capa de átomos de carbono, se ha consolidado como uno de los materiales más prometedores del siglo XXI gracias a sus propiedades excepcionales. Desde su descubrimiento en 2004, ha sentado las bases para el estudio de toda la familia de materiales 2D e inspirado una intensa investigación orientada al desarrollo de aplicaciones científicas y tecnológicas innovadoras. Este artículo describe los principales métodos de síntesis del grafeno, agrupados en enfoques descendentes y ascendentes, resaltando la técnica de deposición química de vapor (CVD) como la opción más prometedora para producirlo a gran escala y de alta calidad. Además, se presentan las propiedades estructurales que explican su comportamiento sorprendente, así como sus numerosas aplicaciones actuales, destacando su potencial en campos como la electrónica, la energía, la medicina, el medio ambiente y las tecnologías de la información y la comunicación. El grafeno no solo ha impulsado la era de los materiales 2D, sino que continúa potenciando el desarrollo de tecnologías más sostenibles, eficientes y limpias.

Palabras clave: grafeno, nanotecnología, nanomaterial bidimensional, síntesis, ciencia.

Abstract

Graphene, a two-dimensional (2D) material composed of a single layer of carbon atoms, has been positioned as one of the most promising materials of the 21st century due to its exceptional properties. Since its discovery in 2004, it has established the foundation for the study of the entire family of 2D materials and inspired intense research aimed at developing innovative scientific and technological applications. This article describes the primary methods of graphene synthesis, categorized into top-down and bottom-up approaches, with a focus on the chemical vapor deposition (CVD) technique as the most promising option for producing graphene on a large scale and with high quality. It also presents the structural properties that explain its remarkable behavior, along with its numerous current applications, emphasizing its potential in fields such as electronics, energy, medicine, the environment, and information and communication technologies. Graphene has not only promoted the era of 2D materials, but also continues to enable the development of more sustainable, efficient, and cleaner technologies.

Keywords: graphene, nanotechnology, two-dimensional nanomaterial, synthesis, science.

Introducción

¿Por qué el grafeno es mucho más que una capa de carbono?

El grafeno es uno de los materiales más sorprendentes y prometedores del siglo XXI, capaz de revolucionar múltiples campos de la ciencia, la medicina y la tecnología. Formado por una sola capa de átomos de carbono, es el material más delgado conocido hasta ahora. Sus propiedades excepcionales han despertado un enorme interés en la comunidad científica, especialmente por su potencial para desarrollar dispositivos portátiles, flexibles y altamente eficientes, capaces de consumir menos energía y ser más económicos y amigables con el medio ambiente.

La historia del grafeno comenzó en 2004, cuando Andre Geim y Konstantin Novoselov, de la Universidad de Mánchester, lograron aislar por primera vez una única capa de átomos de carbono. Lo más sorprendente de su descubrimiento fue que utilizaron una técnica extremadamente sencilla: la exfoliación mecánica, como se aprecia en la Figura 1. Este método consistió en presionar un trozo de grafito sobre una cinta adhesiva para adherir algunas de sus capas, y luego en pegar y despegar la cinta repetidamente, separando progresivamente las capas más gruesas en capas cada vez más delgadas hasta obtener una sola capa de átomos de carbono (Novoselov et al., 2004). Así nació el primer material bidimensional (2D) de la historia.

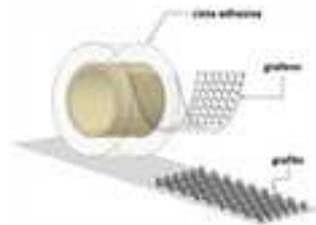


Figura 1. Obtención de grafeno por exfoliación mecánica. (Elaboración propia)

Este descubrimiento representó un avance fundamental en la ciencia de los materiales, y en 2010 Geim y Novoselov fueron galardonados con el Premio Nobel de Física “por sus experimentos pioneros sobre el material bidimensional grafeno” (The Nobel Prize in Physics 2010, n.d.). Desde

entonces, el grafeno ha sido considerado el “padre” de los materiales 2D y ha abierto la puerta al hallazgo de otros materiales, como el disulfuro de molibdeno (MoS), que también muestra propiedades excepcionales para su aplicación en dispositivos avanzados (An et al., 2022). Los materiales 2D o bidimensionales son materiales cuya estructura tiene un espesor de apenas uno o unos pocos átomos, lo que les otorga una estructura extremadamente delgada, como una hoja de papel, pero a escala nanométrica que se extiende prácticamente en dos dimensiones (largo y ancho). Esta característica les confiere propiedades únicas, eléctricas, mecánicas, ópticas y químicas, que no se observan en materiales convencionales.

Pero ¿qué hace tan especial al grafeno? La clave está en su estructura: una sola capa de átomos de carbono dispuestos en una red cristalina hexagonal, similar a un panel de abejas, como se ilustra en la Figura 2. En este patrón, los átomos están fuertemente unidos mediante enlaces covalentes, lo que le otorga una resistencia comparable a la del acero y los convierte en excelentes conductores eléctricos, superando al cobre (Geim & Novoselov, 2007). Además, se destaca por su capacidad de conducir el calor mejor que cualquier otro material conocido.

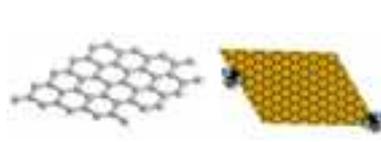


Figura 2. Esquema ilustrativo de la estructura del grafeno similar a un panel de abejas. (Elaboración propia)

Es fascinante cómo el simple reordenamiento de los átomos de carbono puede dar lugar a materiales con propiedades completamente distintas. Este elemento, tan común en la naturaleza, puede adoptar diferentes formas estructurales conocidas como alótropos, entre las cuales se

encuentran el diamante, el grafito, los nanotubos de carbono, el fullereno y el propio grafeno (Saeed et al., 2020), ver Figura 3. Por ejemplo, mientras el diamante es extremadamente duro y actúa como un excelente aislante, el grafito es sumamente suave, frágil y conduce muy bien la electricidad y el calor.

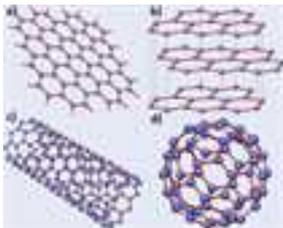


Figura 3. Alótropos de carbono: a) grafeno, b) grafito, c) nanotubos de carbono y d) fullereno. (<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-7058/19/11/34>)

Las grandes expectativas en el grafeno y en su integración con otros compuestos para impulsar el desarrollo de futuros dispositivos siguen motivando una intensa investigación de este material. Por esta razón, en este artículo exploraremos las diferentes formas de obtener el grafeno en la actualidad, sus propiedades más fascinantes y cómo este material está transformando el futuro de la tecnología y de nuestra sociedad.

Síntesis de grafeno: Rutas para obtener uno de los materiales más versátiles del siglo XXI

El grafeno fue descubierto de una manera ingeniosa: al despegar una única capa de átomos de carbono del grafito utilizando cinta adhesiva. Aunque este método es sencillo y accesible, no es adecuado para producir grandes cantidades de grafeno, como se requiere en aplicaciones tecnológicas avanzadas. Hoy en día, se han desarrollado múltiples métodos para su producción, los cuales se pueden dividir en dos enfoques: de arriba hacia abajo (ruta descendente) y de abajo hacia arriba (ruta ascendente).

El enfoque descendente consiste en la exfoliación, separación o fragmentación

de material gráfitico en bulto (en volumen) para obtener el grafeno. Este es el método que Geim y Novoselov utilizaron en su descubrimiento. El enfoque ascendente implica la síntesis de material, en la que se forman enlaces entre los átomos de carbono en el plano, construyendo la estructura 2D. Este método permite una producción más controlada y escalable de grafeno de alta calidad (Bhuyan et al., 2016). Los dos enfoques han desarrollado diversas técnicas para la producción de grafeno, como se muestra en la Figura 4.



Figura 4. Enfoque descendente y ascendente para la síntesis de grafeno. (Elaboración propia)

Entre las técnicas de la ruta descendente se incluyen la exfoliación mecánica, la exfoliación química y la síntesis química. La exfoliación mecánica utiliza cinta adhesiva u otras herramientas similares para producir capas de grafeno de alta calidad; sin embargo, esta técnica se limita a estudios de laboratorio, ya que no es adecuada para la producción a gran escala (Bhuyan et al., 2016; Zhang, 2022). Por otro lado, la exfoliación química modifica el grafito para obtener una solución coloidal de grafeno, separando las capas al debilitar las fuerzas de Van der Waals, ya sea por calentamiento o sonicación. Aunque es más adecuada para la producción a gran escala, esta técnica puede generar defectos estructurales e impurezas en el material obtenido (Bhuyan et al., 2016; Parvez et al., 2015).

La reducción de óxido de grafito es uno de los métodos de síntesis química más comunes para obtener grafeno. Consiste en oxidar grafito con ayuda de ácidos fuertes y agentes oxidantes para formar óxido de grafeno (GO), que posteriormente se reduce mediante procesos químicos, tér-

micos o electroquímicos para obtener capas de grafeno (Bhuyan et al., 2016; Zhang, 2022). A pesar de ser un método sencillo y económico que permite producir grandes cantidades de grafeno, la calidad final del material puede verse afectada, ya que resulta difícil obtener grafeno puro y de una sola capa.

Entre las técnicas ascendentes, se incluyen el crecimiento epitaxial, la ablación láser y la deposición química de vapor (CVD, por sus siglas en inglés). El crecimiento epitaxial se logra calentando carburo de silicio (SiC) a altas temperaturas, lo que provoca la evaporación de los átomos de Si y deja una capa de átomos de C que se reorganizan para formar grafeno en la superficie (Bhuyan et al., 2016; Zhang, 2022). Aunque este método ofrece buena uniformidad y grafeno en monocapa, enfrenta desafíos como la alta temperatura y la dificultad de transferir el grafeno a otros sustratos.

Si bien la elección del método de producción es clave para definir el tipo de aplicación del grafeno, la técnica CVD es la más utilizada y prometedora, ya que permite obtener grafeno de alta calidad y gran área, y además permite escalar su producción para aplicaciones industriales, electrónicas y ópticas. Este proceso consiste en descomponer gases que contienen carbono, como el metano, sobre una superficie metálica (generalmente cobre o níquel), a altas temperaturas entre 700 y 1000 °C, formando una capa de grafeno en el sustrato (Bhuyan et al., 2016; Zhang, 2022). Posteriormente, se realiza un proceso de transferencia para eliminar el metal y depositar el grafeno sobre el sustrato final requerido para las aplicaciones deseadas.

El desafío en la transferencia de grafeno a un sustrato final

La investigación para lograr una transferencia de grafeno libre de defectos ha avanzado significativamente. Hoy en día, se han propuesto varios métodos para garantizar una transferencia efectiva y mantener su integridad estructural. Entre los más comunes se encuentran la transferencia húmeda, que emplea soluciones

químicas y una capa de polímero para proteger el grafeno, y la transferencia en seco, que evita el uso de reactivos líquidos. También se incluyen la delaminación asistida por burbujas y la transferencia directa, en la que se busca sintetizar grafeno directamente sobre el sustrato final, evitando la necesidad de un proceso de transferencia (Ullah et al., 2021). En este contexto, un sustrato es la superficie o el material base sobre el que se deposita el grafeno. Esta combinación del grafeno con el sustrato es la que finalmente se utiliza para crear diversos dispositivos y materiales con propiedades avanzadas.

Cada método tiene sus propias ventajas y limitaciones, pero todos requieren un gran cuidado y un control preciso del proceso. Por ejemplo, como se ilustra en la Figura 5, en la transferencia húmeda basada en polímeros se utiliza una capa polimérica de soporte para proteger el grafeno durante su manipulación. Posteriormente, el sustrato de crecimiento (cobre o níquel) se disuelve químicamente, se realiza un lavado y se transfiere el grafeno al sustrato final. Por último, la capa soporte se disuelve para obtener una superficie limpia y con la menor cantidad de residuos posible (Martínez-López et al., 2024). Este tipo de transferencia se lleva a cabo en el grupo de investigación del Laboratorio de Nanofotónica, el cual forma parte de los programas de posgrado de la Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas del Instituto Politécnico Nacional (UPIITA-IPN), donde se ha perfeccionado esta técnica para su aplicación en el desarrollo de materiales avanzados.



Figura 5. Esquema de la transferencia húmeda (usando soluciones químicas) de grafeno a un sustrato final. (Elaboración propia).

Una mirada a sus propiedades más fascinantes

Las enormes expectativas en el grafeno se deben a sus propiedades sorprendentes. Para entenderlas, primero hay que mirar su estructura: el grafeno forma una red bidimensional, compuesta por una capa de átomos de carbono, como se aprecia en la Figura 6. En esta capa, cada átomo aporta tres de sus cuatro electrones de valencia (electrones que participan en la formación de enlaces) para dar lugar a los conocidos orbitales híbridos sp^2 , es decir, una combinación de orbitales atómicos que permite la formación de enlaces fuertes en un plano. Los electrones en estos orbitales híbridos se orientan hacia los tres átomos vecinos y forman enlaces simples de tipo covalente entre los átomos, llamados enlaces sigma (σ). Precisamente, estos enlaces son los responsables de que el grafeno sea un material con una estructura hexagonal de gran resistencia mecánica (Subramaniam et al., 2023).

El cuarto electrón de valencia de cada átomo ocupa un orbital tipo p , que no se hibrida y se orienta perpendicular al plano de la capa. Al solaparse con los orbitales vecinos, forma los enlaces pi (π), ver Figura 6. En conjunto, estos electrones generan una nube electrónica deslocalizada que se extiende por encima y por debajo del plano hexagonal del grafeno. Esta nube permite que los electrones se muevan libremente, lo que explica la alta conductividad eléctrica y otras propiedades electrónicas únicas del grafeno (Geim & Novoselov, 2007). Esa misma nube deslocalizada puede interactuar de manera electrostática con las nubes electrónicas de otros materiales (incluidas otras capas de grafeno), generando atracciones o repulsiones entre las nubes y dando paso a los enlaces de tipo Van der Waals.

Con un espesor de aproximadamente 0.335 nm (equivalente al grosor de un átomo de carbono), el grafeno es el material más delgado conocido hasta este momento. Para ponerlo en perspectiva, se necesitarían apilar unas 300.000 capas de grafeno para igualar el espesor de una hoja de papel. Gracias a este espesor, es un material casi transparente, ya que absorbe solamente el 2.3 % de la radiación incidente (An et al., 2022).

También tiene una alta flexibilidad, lo que abre la puerta a numerosas aplicaciones tecnológicas.

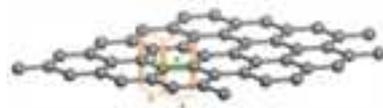


Figura 6. Representación esquemática de cómo se unen los átomos en el grafeno: enlaces σ y π . (Elaboración propia)

La era del grafeno y los materiales 2D

El descubrimiento del grafeno no solo ha transformado la ciencia de los materiales; también ha impulsado significativamente la búsqueda de nuevos materiales 2D. Gracias a este esfuerzo, hoy es posible aislar capas atómicas a partir de materiales en bulto (en volumen). Incluso semiconductores tan estudiados como el silicio y el germanio se han reducido a su forma monoatómica, dando origen a nuevos materiales 2D, como el siliceno y el germaneno, con propiedades completamente distintas a las de su forma en bulto.

Este fenómeno no se limita a elementos puros: también se ha extendido a compuestos y aleaciones semiconductoras, como el GaSe, GaN y los ya populares dicalcogenuros de metales de transición (TMDs), por ejemplo, el MoS_2 y WS_2 , entre otros. Las extraordinarias propiedades de estos materiales han motivado a la comunidad científica a explorar los materiales 2D como una estrategia para modificar radicalmente las propiedades físicas y químicas, revelando comportamientos exóticos ausentes en sus contrapartes en bulto.

Además, como ya se mencionó, los enlaces de Van der Waals presentes en la superficie del grafeno permiten combinar distintos materiales 2D sin necesidad de que sus redes cristalinas coincidan perfectamente. Esto ha propiciado la generación de heteroestructuras apiladas, que son estructuras formadas por capas de diferentes materiales, colocadas una sobre otra, como si se tratara de bloques de Lego a escala atómica. Así se pueden integrar materiales como sili-

ceno, germaneno y grafeno en una sola estructura, como se muestra en la Figura 7. Esta flexibilidad permite diseñar materiales con propiedades ajustables para aplicaciones específicas, combinando las mejores características de cada material.



Figura 7. Heteroestructura formada por capas de diferentes materiales 2D. (Elaboración propia)

Avances y oportunidades tecnológicas del grafeno

Desde su descubrimiento, el grafeno ha dejado de ser un simple hallazgo de laboratorio para convertirse en el motor de múltiples avances que prometen transformar la tecnología tal como la conocemos, impulsando el desarrollo de aplicaciones de próxima generación. Si bien su descubrimiento mereció el Premio Nobel de Física en 2010, su impacto en la tecnología y la sociedad apenas comienza a vislumbrarse.

En el mundo de la electrónica, el grafeno ha mostrado un gran potencial en el desarrollo de dispositivos microelectrónicos y optoelectrónicos gracias a su alta movilidad electrónica y su excelente conductividad. Estas características, junto con la posibilidad de ajustar sus propiedades ópticas, lo convierten en un material ideal para el desarrollo de transistores ultrarrápidos, fotodetectores, diodos emisores de luz, láseres, sensores, pantallas flexibles y circuitos impresos avanzados (Bao et al., 2009; Han et al., 2017; Jia et al., 2016; Lu et al., 2009; Sengupta & Hussain, 2022; Xia et al., 2009), como ejemplo ver Figura 8. A diferencia del silicio, el grafeno permite fabricar dispositivos más delgados, flexibles y eficientes, con velocidades de operaciones superiores y con un menor consumo energético. Por estas razones, el grafeno se perfila como un componente clave para futuras aplicaciones en teléfonos móviles, pantallas táctiles y computadoras de alto rendimiento (Research, n.d.; Santos et al., 2025).

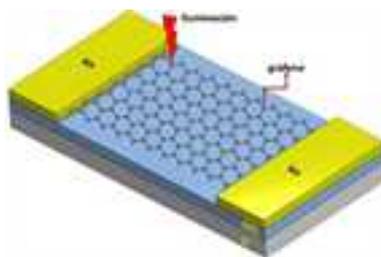


Figura 8. Estructura de un fotodetector de grafeno bajo iluminación, con los contactos en la parte superior. (Elaboración propia)

En la industria energética, el grafeno también ha despertado un gran interés. Este material mejora la capacidad y la velocidad de carga de las baterías (Hou et al., 2011; Xiang et al., 2016), un aspecto esencial para vehículos eléctricos y dispositivos portátiles que requieren baterías de larga duración. Por ejemplo, empresas como Huawei han desarrollado baterías usando grafeno, las cuales son capaces de operar a temperaturas más altas (hasta 60 °C) y con mayor durabilidad que las baterías de iones de litio convencionales. Esta innovación fue anunciada en 2016 por Watt Laboratory, y representa un paso importante hacia dispositivos más resistentes y de mayor vida útil (Huawei Achieves Major Breakthrough in Graphene-Assisted High Temperature Li-Ion Batteries - Huawei Press Center, n.d.). Además, en productos como el Huawei Mate 20 X, la empresa empleó una lámina de grafeno para ayudar a disipar el calor, lo que mantiene el dispositivo más fresco durante el uso intensivo (Huawei Community, n.d.).

En el campo de los materiales compuestos y recubrimientos, el grafeno se utiliza como aditivo para la fabricación de productos más ligeros, resistentes, duraderos, anticorrosivos y antimicrobianos. Esto mejora el rendimiento y la eficiencia de los materiales sin comprometer su durabilidad, impulsando su aplicación en sectores como la industria automotriz, aeroespacial, de concreto, plástico y pinturas (Aditivo para concreto - Graphenemex, 2023; Awate et al., 2023; Graphenemex, 2022, 2024b).

En medicina, el grafeno ha despertado gran interés por su compatibilidad con el cuerpo humano. Actualmente, se explora su uso en distintas aplicaciones, como la liberación controlada de medicamentos, el transporte eficiente de fármacos, la detección de biomarcadores y el desarrollo de biosensores para el diagnóstico de enfermedades (Priyadarsini et al., 2018). Estas aplicaciones brindan la oportunidad de desarrollar tratamientos más precisos, terapias personalizadas y tecnologías de diagnóstico más sensibles y tempranas (Mohamed Noor et al., 2025).

Además, en tecnologías de membranas para la purificación de agua, el grafeno ha mostrado una gran capacidad para desalinizar y filtrar contaminantes, incluso los iones más pequeños, lo que lo establece

como una solución prometedora para potabilizar el agua (Graphenemex, 2024; Suk & Aluru, 2010; Yasmeen et al., 2025).

Por último, el grafeno es ideal para aplicaciones en tecnologías de la información y comunicación debido a su alta conductividad eléctrica, que permite su integración en antenas y sistemas de telecomunicaciones, incrementando la velocidad y capacidad de transmisión de datos (Hasan et al., 2016; Moon et al., 2009). Tanto por sus aplicaciones actuales como por las que se vislumbran a futuro, el grafeno sigue siendo una pieza clave en la innovación de múltiples industrias, perfilándose como un material fundamental para el desarrollo de tecnologías de próxima generación.

Conclusiones

El grafeno se ha consolidado, desde su descubrimiento en 2004 por Geim y Novoselov, como uno de los materiales más prometedores y revolucionarios de nuestra época. Su estructura, formada por una sola capa de átomos de carbono, le otorga propiedades excepcionales, como ser el material más delgado conocido, extraordinariamente resistente, flexible, transparente y un excelente conductor tanto de electricidad como de calor. Estas propiedades únicas lo distinguen de otros alótropos del carbono y lo convierten en un material con el potencial de transformar numerosos sectores.

En este trabajo se exploraron los diferentes métodos para su síntesis, desde la técnica más sencilla, como la exfoliación mecánica, hasta técnicas más escalables como la deposición química de vapor. Aunque cada método presenta ventajas y desafíos, la continua evolución de estos métodos ha permitido producir grafeno de alta calidad y de gran área, facilitando su incorporación a nivel industrial. Además, el grafeno ya está impulsando una nueva generación de tecnologías y la búsqueda de nuevos materiales 2D, expandiendo las fronteras de la ciencia de los materiales.

El impacto del grafeno abarca un amplio conjunto de aplicaciones y de campos. En la electrónica, promete dispositivos más eficientes, delgados y ultrarrápidos, como transistores, sensores, pantallas táctiles y flexibles. En el sector energético, está mejorando la capacidad, velocidad y durabilidad de las baterías, características esenciales para vehículos eléctricos y dispositivos portátiles. Como aditivo en materiales compuestos, permite generar productos más ligeros, resistentes, anticorrosivos y antimicrobianos. En medicina, se explora su uso en la liberación controlada de medicamentos y transporte de fármacos, la detección de biomarcadores y el desarrollo de biosensores. Además, su capacidad para la purificación de agua y su aplicación en tecnologías de la información y la comunicación resaltan aún más su desempeño y versatilidad. Aunque aún existen desafíos técnicos, como la producción a gran escala libre de defectos o la transferencia eficiente a distintos sustratos, el avance continuo en la investigación indica que el grafeno seguirá siendo un material clave en la construcción de un futuro tecnológico más eficiente e innovador.

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.

Conflicto de interés

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

Agradecimientos

Los autores agradecen sinceramente al IPN y a la SECIHTI por el apoyo financiero para el desarrollo de este trabajo. En particular, extendemos nuestros agradecimientos a los proyectos, SIP 20253723, PRORED 20254785 y a los proyectos de Ciencia de Frontera SECIHTI CF-2023-I-1117 y SECIHTI CBF-2025-I-3719.

Referencias

- Aditivo para concreto—Graphenemex. (2023, April 11). <https://www.graphenemex.com/aplicaciones/aditivo-para-concreto/>
- An, J., Zhao, X., Zhang, Y., Liu, M., Yuan, J., Sun, X., Zhang, Z., Wang, B., Li, S., & Li, D. (2022). Perspectives of 2D Materials for Optoelectronic Integration. *Advanced Functional Materials*, 32(14), 2110119. <https://doi.org/10.1002/adfm.202110119>
- Awate, P. P., Barve, S. B., Pesode, P., & Shinde, S. S. (2023). Graphene/Al6O61 nanocomposite for aerospace and automobile application. *Materials Today: Proceedings*, S2214785323039469. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.075>
- Bao, Q., Zhang, H., Wang, Y., Ni, Z., Yan, Y., Shen, Z. X., Loh, K. P., & Tang, D. Y. (2009). Atomic Layer Graphene as a Saturable Absorber for Ultrafast Pulsed Lasers. *Advanced Functional Materials*, 19(19), 3077–3083. <https://doi.org/10.1002/adfm.200901007>
- Bhuyan, Md. S. A., Uddin, Md. N., Islam, Md. M., Bipasha, F. A., & Hossain, S. S. (2016). Synthesis of graphene. *International Nano Letters*, 6(2), 65–83. <https://doi.org/10.1007/s40089-015-0176-1>
- Geim, A. K., & Novoselov, K. S. (2007). The rise of graphene. *Nature Materials*, 6(3), 183–191. <https://doi.org/10.1038/nmat1849>
- Graphenemex, E. (2022, July 28). La revolución del grafeno en la industria automotriz: Innovación en cuidado y protección de vehículos - Graphenemex. <https://www.graphenemex.com/soluciones-con-grafeno/grafeno-exfoliado/grafeno/industria-automotriz-eg/la-revolucion-del-grafeno-en-la-industria-automotriz-innovacion-en-cuidado-y-proteccion-de-vehiculos/>
- Graphenemex, E. (2024a, July 24). Innovaciones en Tecnologías del Agua—Graphenemex. <https://www.graphenemex.com/soluciones-con-grafeno/grafeno-exfoliado/grafeno/energias-limpias/innovaciones-en-tecnologias-del-agua/>

Graphenemex, E. (2024b, September 24). El Impacto del Grafeno en la Industria del Plástico: - Graphenemex. <https://www.graphenemex.com/soluciones-con-grafeno/oxido-de-grafeno/sostenibilidad-og/el-impacto-del-grafeno-en-la-industria-del-plastico/>

Han, T.-H., Kim, H., Kwon, S.-J., & Lee, T.-W. (2017). Graphene-based flexible electronic devices. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 118, 1–43. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2017.05.001>

Hasan, M., Arezoomandan, S., Condori, H., & Sensale-Rodriguez, B. (2016). Graphene terahertz devices for communications applications. *Nano Communication Networks*, 10, 68–78. <https://doi.org/10.1016/j.nancom.2016.07.011>

Hou, J., Shao, Y., Ellis, M. W., Moore, R. B., & Yi, B. (2011). Graphene-based electrochemical energy conversion and storage: Fuel cells, supercapacitors and lithium ion batteries. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 13(34), 15384. <https://doi.org/10.1039/c1cp21915d>

Huawei Achieves Major Breakthrough in Graphene-Assisted High Temperature Li-ion Batteries—Huawei press center. (n.d.). Huawei. Retrieved June 11, 2025, from <https://www.huawei.com/en/news/2016/12/Graphene-Assisted-Li-ion-Batteries> Huawei Community. (n.d.). Consumer.Huawei.Com. Retrieved June 11, 2025, from https://consumer.huawei.com/en/community/details/Tech-Class-15-Full-introduction-on-HUAWEl-SuperCool-technology-of-Mate-20-X/topicId_17567/

Jia, S., Sun, H. D., Du, J. H., Zhang, Z. K., Zhang, D. D., Ma, L. P., Chen, J. S., Ma, D. G., Cheng, H. M., & Ren, W. C. (2016). Graphene oxide/graphene vertical heterostructure electrodes for highly efficient and flexible organic light emitting diodes. *Nanoscale*, 8(20), 10714–10723. <https://doi.org/10.1039/C6NR01649A>

Lu, G., Ocola, L. E., & Chen, J. (2009). Gas detection using low-temperature reduced graphene oxide sheets. *Applied Physics Letters*, 94(8), 083111. <https://doi.org/10.1063/1.3086896>

- Martínez-López, A. L., Cruz-Bueno, J. J., Trejo-Hernández, R., Rocha-Robledo, A. K. S., de-Luna-Bugallo, A., Kudriavtsev, Y., García-Salgado, G., Casallas-Moreno, Y. L., & Mendoza-Álvarez, J. G. (2024). Impact of graphene as 2D interlayer on the growth of GaAs by CSVT on Si (100) and GaAs (100) substrates. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 181, 108605. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2024.108605>
- Mohamed Noor, A., Amanina Mohd Zin, F., Hasenan, N., & Seong Wei, L. (2025). Graphene-Based Nanomaterials for Drug Delivery. In S. K. Swain (Ed.), *Carbon Based Nanomaterials for Drug Delivery* (pp. 229–260). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-8086-0_8
- Moon, J. S., Curtis, D., Hu, M., Wong, D., McGuire, C., Campbell, P. M., Jernigan, G., Tedesco, J. L., VanMil, B., Myers-Ward, R., Eddy, C., & Gaskill, D. K. (2009). Epitaxial-Graphene RF Field-Effect Transistors on Si-Face 6H-SiC Substrates. *IEEE Electron Device Letters*, 30(6), 650–652. <https://doi.org/10.1109/LED.2009.2020699>
- Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S. V., Grigorieva, I. V., & Firsov, A. A. (2004). Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. *Science*, 306(5696), 666–669. <https://doi.org/10.1126/science.1102896>
- Parvez, K., Yang, S., Feng, X., & Müllen, K. (2015). Exfoliation of graphene via wet chemical routes. *Synthetic Metals*, 210, 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2015.07.014>
- Priyadarsini, S., Mohanty, S., Mukherjee, S., Basu, S., & Mishra, M. (2018). Graphene and graphene oxide as nanomaterials for medicine and biology application. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 8(2), 123–137. <https://doi.org/10.1007/s40097-018-0265-6>
- Research, B. I. S. (n.d.). Graphene Composites: The Super-Material Shaping a Smarter Future. Retrieved June 11, 2025, from <https://blog.marketresearch.com/graphene-composites-the-super-material-shaping-a-smarter-future>

- Saeed, M., Alshammari, Y., Majeed, S. A., & Al-Nasrallah, E. (2020). Chemical Vapour Deposition of Graphene—Synthesis, Characterisation, and Applications: A Review. *Molecules*, 25(17), 3856. <https://doi.org/10.3390/molecules25173856>
- Santos, T. F., Souza, D. F. S., Santos, E. V., Carvalho, B. R., & Nascimento, J. H. O. (2025). Graphene and graphene quantum dots applied to batteries and supercapacitors. *Nano Trends*, 9, 100077. <https://doi.org/10.1016/j.nwnano.2025.100077>
- Sengupta, J., & Hussain, C. M. (2022). Graphene-Induced Performance Enhancement of Batteries, Touch Screens, Transparent Memory, and Integrated Circuits: A Critical Review on a Decade of Developments. *Nanomaterials*, 12(18), 3146. <https://doi.org/10.3390/nano12183146>
- Subramaniam, R. T., Kasi, R., Bashir, S., & Kumar, S. A. (Eds.). (2023). *Graphene: Fabrication, Properties and Applications*. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-981-99-1206-3>
- Suk, M. E., & Aluru, N. R. (2010). Water Transport through Ultrathin Graphene. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 1(10), 1590–1594. <https://doi.org/10.1021/jz100240r>
- The Nobel Prize in Physics 2010. (n.d.). NobelPrize.Org. Retrieved July 1, 2025, from <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2010/summary/>
- Ullah, S., Yang, X., Ta, H. Q., Hasan, M., Bachmatiuk, A., Tokarska, K., Trzebicka, B., Fu, L., & Rummeli, M. H. (2021). Graphene transfer methods: A review. *Nano Research*, 14(11), 3756–3772. <https://doi.org/10.1007/s12274-021-3345-8>
- Xia, F., Mueller, T., Lin, Y., Valdes-Garcia, A., & Avouris, P. (2009). Ultrafast graphene photodetector. *Nature Nanotechnology*, 4(12), 839–843. <https://doi.org/10.1038/nnano.2009.292>
- Xiang, Z., Dai, Q., Chen, J., & Dai, L. (2016). Edge Functionalization of Graphene and TwoDimensional Covalent Organic Polymers for Energy Conversion and Storage. *Advanced Materials*, 28(29), 6253–6261. <https://doi.org/10.1002/adma.201505788>

Yasmeen, R., Khan, F. S., Nisa, W. U., Saleem, A. R., Awais, M., Jameel, M., Dara, R. N., & Khan, M. (2025). Enhanced water purification by using graphene oxide nano-membranes: A novel approach for mitigating industrial pollutant. *Carbon Trends*, 19, 100486. <https://doi.org/10.1016/j.cartre.2025.100486>

Zhang, T. (2022). New Materials. In T. Zhang, *Graphene From Theory to Applications* (pp. 105–127). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4589-1_7

HIDROGELES DINÁMICOS: EXPLORANDO SUS PROPIEDADES Y SU TRANSFORMACIÓN EN LA CIENCIA MODERNA

DYNAMIC HYDROGELS: EXPLORING THEIR PROPERTIES
AND THEIR TRANSFORMATION IN MODERN SCIENCE

Rubí Estrada-Ramírez¹,
José Manuel Pérez-Aguilar²,
Valeria González-Coronel³,
Brenda L. Sánchez Gaytán¹,
Guillermo Soriano-Moro¹

¹Centro de Química-Instituto de Ciencias, BUAP

²Facultad de Ciencias Químicas, BUAP

³Facultad de Ingeniería Química, BUAP

Correos:

ing.estradamx@outlook.com

jmanuel.perez@correo.buap.mx

valeria.gonzalez@correo.buap.mx

brendale@correo.buap.mx

jesus.soriano@correo.buap.mx

<https://orcid.org/0009-0002-0895-432X>

<https://orcid.org/0000-0002-9893-5992>

<https://orcid.org/0000-0002-9670-8876>

<https://orcid.org/0000-0002-3595-1063>

<https://orcid.org/0000-0003-1889-9600>

FOLIO A11N104.25/1020

Resumen

En este artículo se presentan los pilares fundamentales de los hidrogeles, abarcando su clasificación, los polímeros constitutivos, las estrategias de síntesis, las tipologías emergentes, sus propiedades distintivas y sus aplicaciones innovadoras. Los hidrogeles pueden originarse a partir de monómeros o combinaciones híbridas de monómeros naturales y sintéticos. Su fabricación integra mecanismos de reticulación física, química o combinada, empleando rutas sintéticas diversas que incluyen el colado en solución, la mezcla homogénea de dispersiones, la polimerización en masa, la iniciación por radicales libres, la reticulación inducida por radiación y la generación de redes poliméricas interpenetradas. Los hidrogeles resultantes exhiben atributos sobresalientes, tales como tenacidad mecánica, biocompatibilidad, capacidad de hinchamiento y responsividad a estímulos externos, propiedades que los posicionan como candidatos idóneos para aplicaciones biomédicas avanzadas. El desarrollo de hidrogeles, permite optimizar características clave como la robustez mecánica, la adhesión interfacial, la elasticidad, la sensibilidad a la deformación, la capacidad de autoregeneración y la capacidad de hinchamiento determinantes para garantizar la fiabilidad y durabilidad para sus aplicaciones.

Palabras clave: hidrogeles, redes tridimensionales, polímeros naturales y sintéticos, síntesis de hidrogeles, clasificación de hidrogeles.

Abstract

This article presents the fundamental pillars of hydrogels, covering their classification, constituent polymers, synthesis strategies, emerging types, distinctive properties, and innovative applications. Hydrogels can be derived from monomers or hybrid combinations of natural and synthetic monomers. Their fabrication incorporates physical, chemical, or combined cross-linking mechanisms, employing diverse synthetic routes that include solution casting, homogeneous mixing of dispersions, bulk polymerization, free-radical initiation, radiation-induced cross-linking, and the generation of interpenetrating polymer networks. The resulting hydrogels exhibit outstanding attributes, such as mechanical toughness, biocompatibility, swelling capacity, and responsiveness to external stimuli, properties that position them as ideal candidates for advanced biomedical applications. The development of hydrogels enables the optimization of key characteristics such as mechanical robustness, interfacial adhesion, elasticity, strain sensitivity, self-healing capability, and swelling capacity—all of which are critical for ensuring the reliability and durability of their applications.

Keywords: hydrogels, 3D network, polymers natural and synthetic, synthesis of hydrogels, classification of hydrogels.

Los hidrogeles, redes poliméricas tridimensionales hidrofílicas formadas mediante polimerización y entrecruzamiento de monómeros (Figura 1), han incrementado significativamente su uso en los últimos años en diversos campos, como la ciencia de materiales, la agricultura y la ingeniería ambiental, por mencionar algunas. La versatilidad de los hidrogeles se debe principalmente a la amplia gama de composición química que pueden tener, ya que pueden ser obtenidos mediante monómeros sintéticos, (como la acrilamida y sus derivados), o naturales, (como polisacáridos o péptidos) e incluso combinaciones de ambos, lo que les proporciona características altamente modulables. En específico, la capacidad que tienen los hidrogeles de absorber grandes cantidades de agua (que puede ser hasta 10^3 veces su masa seca), su biocompatibilidad y viscoelasticidad semejante a la de los tejidos biológicos (Batoöl et al., 2022), los convierte en materiales muy útiles en el área biomédica. Aunado a esto, la incorporación dentro de la estructura del hidrogel de grupos funcionales que tienen algún tipo de respuesta a estímulos externos como pH, temperatura, luz o campo magnético, los pueden convertir en sistemas inteligentes que son muy versátiles para aplicaciones de alta precisión y permite adaptaciones dinámicas de los mismos (Estrada et al., 2023). En la Figura 1 se indica la red polimérica e interacciones importantes dentro de la red, como el enredo y la unión física que es de naturaleza no covalente, como enlaces de hidrógeno, fuerzas hidrofóbicas o interacciones iónicas. También, están presentes las interacciones químicas que se dan por enlaces covalentes. Por otra parte, está el tamaño de malla identificado con ξ y (M_c) es la masa molar del polímero entre los puntos de entrecruzamiento. Es decir, el peso molecular promedio de los segmentos de cadena polimérica que conectan dos puntos.

Avances recientes han elevado el potencial de los hidrogeles en numerosas aplicaciones. Por ejemplo, son utilizados para la preparación de nanocompuestos poliméricos con memoria de forma fotoinducida con nanopartículas de óxido de tungsteno

(WO2.9, donde el 2.9 indica una proporción específica de tungsteno y oxígeno dentro de la nanopartícula) curables por UV que se utilizan para impresión 4D de alta resolución y geometrías complejas mediante procesamiento digital de luz foto conmutable (Feng et al., 2024), mientras que hidrogeles conductores basados en grafeno son usados en aplicaciones biomédicas basadas en terapias fototérmicas, ya que facilitan la cicatrización de heridas y la regeneración ósea, además de ser de gran utilidad en la terapia contra el cáncer (Croitoru et al., 2024) ya que su capacidad de autorreparación y degradación programada abre nuevas posibilidades para implantes y sistemas de entrega de fármacos.

En agricultura, los hidrogeles biodegradables suelen utilizarse para el tratamiento de aguas residuales y suelos debido a que optimizan la retención hídrica y la liberación de nutrientes en suelos áridos, reduciendo el consumo de recursos hídricos en hasta un 40 % (Agbna & Zaidi, 2025). En biomedicina, su capacidad de autorreparación y degradación programada abre nuevas posibilidades para implantes y sistemas de entrega de fármacos.

El presente artículo analiza sus características, desde su síntesis hasta sus aplicaciones prácticas, destacando cómo la optimización de sus propiedades fisicoquímicas está redefiniendo la interacción entre materiales sintéticos con sistemas vivos. Para ello, se presentan ejemplos concretos y proyecciones basadas en las investigaciones más actuales, subrayando su relevancia en la ciencia contemporánea.

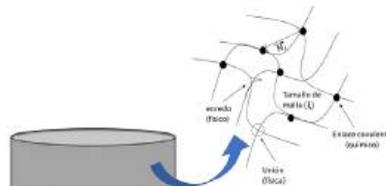


Figura 1. Representación de la estructura de un hidrogel.

La categorización de los hidrogeles depende de un conjunto multifacético de atributos, que abarcan sus características fisicoquímicas, comportamiento de hinchamiento, metodología de síntesis, precedencia, distribución de carga iónica, materiales de origen, cinética de biodegradación y la naturaleza de su arquitectura de reticulación. Este marco de clasificación intrincado refleja los diversos perfiles estructurales y funcionales de los hidrogeles, permitiendo su aplicación personalizada en dominios avanzados de biomedicina, farmacéutica e ingeniería. Por lo tanto, los hidrogeles se pueden clasificar de diferente manera como se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Clasificación de hidrogeles.

Los *hidrogeles estáticos*, se caracterizan por una reticulación covalente y presentan una estabilidad fisicoquímica bajo diversas condiciones como temperatura, pH, entre otras. Por el contrario, los *hidrogeles dinámicos* están diseñados para adaptarse a una amplia gama de estímulos externos —como el estrés mecánico, la deformación, gradientes térmicos, exposición fotónica, interacciones iónicas y campos magnéticos—, lo que resulta en funcionalidades avanzadas como la autorreparación, la modulación autónoma de forma o la actuación programable sin incurrir en un fallo estructural catastrófico. Por ejemplo, los hidrogeles dinámicos covalentes que incorporan enlaces con bases de Schiff han demostrado capacidad notable de autorreparación, destacando su potencial en aplicaciones de regeneración de tejidos (Guo et al., 2015). En otros trabajos, se ha evidenciado que la integración de glicerol o nanopartículas en redes de hidrogeles potencializa

la autorreparación y una adhesividad superior (Liu et al., 2023). Asimismo, la incorporación de complejos de metales ha permitido en los hidrogeles transformaciones morfológicas programables y controladas (Vijayavenkataraman et al., 2024), lo cual proyecta esfuerzos continuos para expandir aún más los límites en su diseño y aplicación.

Los hidrogeles estáticos y dinámicos se subclasifican según su capacidad de respuesta a estímulos externos, teniéndose: i) físicos, tales como a temperatura o luz, ii) químicos, debidos a cambio en el pH o fuerza iónica y iii) biológicos, debido al efecto de enzimas. Los estímulos químicos y biológicos son de carácter interno, mientras que los físicos, salvo la temperatura, que puede ser tanto interna como externa, es de carácter externo. Dentro de esta diversidad, destacan los hidrogeles inteligentes con memoria de forma, caracterizados por: 1) una configuración permanente y 2) un código químico o físico que facilita la recuperación de su geometría original (Guo et al., 2015).

Otro tipo de clasificación que se mencionó en la Figura 2, se basa de acuerdo a su origen constitutivo, es decir, si son de origen natural (Figura 3), sintético (Figura 4) o híbridos, es decir a la unión de sintéticos y naturales. Aquellos derivados exclusivamente de polímeros naturales se denominan hidrogeles de matriz biopolimérica, abarcando polisacáridos, polinucleótidos y polipéptidos. Estos biopolímeros, obtenidos de fuentes naturales diversas, se clasifican en subgrupos de acuerdo a su perfil de carga, en neutros, catiónicos o aniónicos. De igual forma, su disponibilidad abundante, bajo costo, carácter no tóxico, biodegradabilidad inherente y propiedades biológicas ventajosas los convierten en materiales de interés destacado. Los progresos recientes en el diseño estructural y la optimización funcional durante las últimas décadas han catalizado un auge en el desarrollo de materiales avanzados para aplicaciones en tecnología biomédica (A et al., 2024).

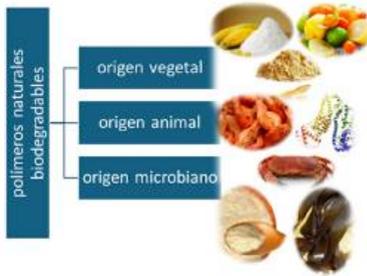


Figura 3. Clasificación de polímeros naturales.

Por otra parte, los polímeros sintéticos, destacan como materiales idóneos en la fabricación de hidrogeles debido a su capacidad para ofrecer propiedades fisicoquímicas ajustables, superando en este aspecto la versatilidad de sus contrapartes naturales. Estas macromoléculas pueden diseñarse con cadenas extendidas y masas moleculares elevadas, llegando a tener la posibilidad de controlar su arquitectura. No obstante, los hidrogeles derivados de polímeros sintéticos exhiben una bioactividad intrínsecamente inferior en comparación con los hidrogeles de origen natural, lo que representa una limitación en contextos biológicos. Su síntesis abarca diversas estrategias, incluyendo la polimerización de monómeros vinílicos o la reticulación química de cadenas previamente sintetizadas. Ejemplos de polímeros sintéticos empleados para este fin se encuentran el polialcohol vinílico (PVA), el polietilenglicol (PEG), el polioxido de etileno (PEO), el polimetacrilato de 2-hidroxietilo (PHEMA), el poliácido acrílico (PAA) y la poliacrilamida (PAM), entre otros (Jung et al., 2022).



Figura 4. Ejemplos de polímeros sintéticos.

Los hidrogeles derivados de poliacrilamida (PAM), por ejemplo, han sido extensamente desarrollados y aplicados en muchas áreas. Estos sistemas, caracterizados por su naturaleza hidrofílica y carga neutra, exhiben propiedades fisicoquímicas sobresalientes como resistencia a la tracción, módulo de elasticidad, por mencionar algunas, que los posicionan como materiales adecuados para su uso como: biomateriales, matrices para la inmovilización de células y biocatalizadores, plataformas de liberación controlada de fármacos, agentes de captura de iones metálicos pesados y herramientas de bioseparación (Wang et al., 2023)

Síntesis de hidrogeles

Los hidrogeles poliméricos se elaboran principalmente a través de dos enfoques ampliamente reconocidos: la polimerización de monómeros con alta afinidad por el agua o la transformación química de polímeros preexistentes, ya sean de origen natural, sintético o híbrido, un ejemplo de polímero híbrido es el elaborado con poliuretano y quitosano que se utiliza como apósito. En el caso de los hidrogeles naturales, su síntesis suele implicar la incorporación de elementos sintéticos sobre una base natural para optimizar sus propiedades (Sharma & Singh, 2024). La obtención de hidrogeles sintéticos, por su parte, se basa en la polimerización de radicales libres de monómeros vinílicos multifuncionales. Estos monómeros poseen dobles enlaces carbono-carbono que sirven como puntos de activación para la formación de cadenas poliméricas (Roy et al., 2022). La obtención de los hidrogeles poliméricos, depende de factores como el tipo de disolvente, las condiciones de reacción y los monómeros empleados, pudiendo llevarse a cabo por estímulos térmicos (mediante iniciadores térmicos), lumínicos (fotoiniciadores), enzimáticos (bioiniciadores) o incluso por radiación de haz de electrones (Morozov et al., 2024). Los hidrogeles típicamente están compuestos por tres elementos esenciales: monómeros, iniciadores y agentes de entrecruzamiento, los cuales pueden diluirse en agua o en otros disolventes para regular la liberación de calor durante el proceso. En términos

prácticos, los hidrogeles se obtienen frecuentemente a partir de monómeros polares, tanto naturales como sintéticos, mediante procesos como la polimerización por injerto, la reticulación química, la formación de redes en medios acuosos o la reticulación inducida por radiación. La formación de hidrogeles también implica la reticulación de polímeros hidrosolubles, naturales, sintéticos o híbridos, a través de diversos métodos: (1) unión química entre cadenas poliméricas, (2) generación de radicales libres en la estructura principal mediante radiación ionizante, para una formación de enlaces de reticulación, y (3) interacciones físicas, como fuerzas electrostáticas, entrelazamientos moleculares o la formación de regiones cristalinas (Sapuła et al., 2023). A pesar de sus ventajas, un desafío en la preparación de hidrogeles radica en la presencia de impurezas residuales, tales como: monómeros que no reaccionaron, iniciadores, agentes de entrecruzamiento y subproductos, que pueden comprometer su pureza, funcionalidad, citocompatibilidad y biodegradabilidad.

Recientemente, en el grupo de investigación del Centro de Química del ICUAP de la BUAP se desarrolló la síntesis de nanocompuestos de nanopartículas de oro e hidrogeles de poli(acrilamida-co-DMAPMA) obtenidos por polimerización fotoiniciada, usando luz solar, y en ausencia de agentes de entrecruzamiento (Estrada et al., 2023). Los hidrogeles resultantes presentaron diversas propiedades, una de ellas fue el porcentaje de hinchamiento de 2298 %, el cual es más alto que al de hidrogeles de PAM reportados en la literatura (Jayaramudu et al., 2019). Estas propiedades pueden ser moduladas por los monómeros utilizados y otros reactivos presentes en el proceso de síntesis. De igual forma, en el grupo de investigación se han sintetizado hidrogeles de PAM utilizando nanopartículas de oro (AuNPs) como agentes de entrecruzamiento. El proceso de síntesis es innovador, teniendo un enfoque de la síntesis verde, en la Figura 5 se muestra una sugerencia del mecanismo de reacción del material nanocompuesto (M. Aguilar et al., 2022).



Figura 5. Representación del proceso de formación de hidrogeles (tomada de la referencia 18).

Propiedades de hidrogeles

La utilización de polímeros, ya sean de origen natural, sintético o híbrido, que tienen grupos laterales hidrofílicos en su estructura química, para la síntesis de hidrogeles destinados a aplicaciones biomédicas ofrece ventajas significativas. Estos grupos funcionales no solo promueven una elevada capacidad de absorción hídrica, sino que también favorecen interacciones específicas con tejidos biológicos, como epitelios y membranas mucosas. En su estado plenamente hinchado, los hidrogeles exhiben un comportamiento viscoelástico, con una textura blanda y elástica y un ángulo

interfacial reducido frente a fluidos biológicos, lo que minimiza la respuesta inmune. Estas características convergen en su notable biocompatibilidad, complementada por una degradabilidad variable que depende de la naturaleza del agente de entrecruzamiento empleado. Un atributo de los hidrogeles es su capacidad de hinchamiento (Figura 6), proceso que se desarrolla en tres etapas distintivas: (i) la difusión inicial de agua hacia la red polimérica, conocida como agua primaria ligada; (ii) la relajación de las cadenas poliméricas, acompañada de la incorporación de agua secundaria ligada; y (iii)

la expansión volumétrica de la malla, asociada a la entrada de agua libre. Según la teoría, este fenómeno se encuentra gobernada por la elasticidad intrínseca de las cadenas poliméricas y su afinidad con las moléculas de agua (Buenger et al., 2012).

Los hidrogeles reticulados covalentemente con grupos laterales iónicos muestran respuesta al pH. Aquellos con grupos aniónicos se expanden a pH elevado debido a la ionización y la subsiguiente repulsión electrostática, mientras que los portadores de grupos catiónicos lo hacen a pH bajo. Ahora, imagina materiales que se transforman como por arte de magia con el calor o el frío: los hidrogeles termosensibles son justo eso. Estos materiales gelatinosos, capaces de absorber agua, se dividen en tres grupos sorprendentes (J. Hu et al., 2023). Los termosensibles positivos se expanden cuando la temperatura supera la llamada temperatura crítica superior de solubilidad (UCST) (Kim et al., 2003), hinchándose como esponjas al calentarse, mientras que los termosensibles negativos hacen lo contrario, creciendo cuando la temperatura cae por debajo de la temperatura crítica inferior de solubilidad (LCST). Además, están los hidrogeles térmicamente reversibles, como los hechos con poloxámero, que cambian de líquido a gel y viceversa según un umbral térmico específico, abriendo la puerta a innovaciones médicas y tecnológicas. Este comportamiento adaptable podría revolucionar desde la liberación controlada de medicamentos hasta la regeneración de tejidos (Wu et al., 2010).



Figura 6. Representación de xerogel (izquierda) e hidrogel hinchado (derecha).

Aplicaciones de hidrogeles

Los hidrogeles se pueden diseñar y modular para que su aplicación sea inyectable, por medio de atomización o implantable, abriendo un mundo de posibilidades en la medicina y la tecnología moderna. Para lograr estos modos de aplicación, es fundamental prestar atención a diversos aspectos del diseño, como la manufactura precisa de sus estructuras, la cinética de gelación que determina cuánto tiempo tarda en solidificarse una vez aplicado, las propiedades reológicas que garantizan su adaptabilidad y fluidez en el cuerpo, y la escalabilidad que asegura su producción a gran escala sin perder calidad. Otros factores, que juegan un papel clave son: la biocompatibilidad que permite su interacción segura con los tejidos vivos, la esterilidad para evitar infecciones y la capacidad de personalización según las necesidades del paciente (Correa et al., 2021).

Las aplicaciones más conocidas en el área de la biomedicina para el uso de los hidrogeles son la liberación controlada de fármacos, donde actúan como reservorios que dosifican medicamentos lentamente, como un reloj biológico interno; los apósitos para heridas, que crean un entorno húmedo ideal para acelerar la cicatrización, protegiendo al mismo tiempo contra bacterias; y la regeneración de tejidos, donde sirven como andamios que guían el crecimiento de nuevas células, como un puente para la naturaleza (Y. Hu et al., 2018; Iresha & Kobayashi, 2020; Kwiecień & Kwiecień, 2018). Pero sus usos van más allá: en el mundo de los cosméticos, los hidrogeles hidratan la piel con fórmulas ligeras que imitan sus capas naturales, mientras que en la agricultura podrían retener agua en suelos áridos como esponjas vivas, y en la ingeniería ambiental podrían capturar contaminantes del agua como filtros inteligentes. Este abanico de posibilidades transforma a los hidrogeles en herramientas innovadoras que, con cada nuevo diseño, prometen mejorar la vida cotidiana y enfrentar desafíos globales con creatividad y sostenibilidad.

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.

Conflicto de interés

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

Agradecimientos

Los autores agradecen a la VIEP-BUAP por el financiamiento otorgado a través de los proyectos 00364 y 00611 así como a la SECIHTI por la beca de doctorado otorgada a R.E.-R. (núm. 1147935).

Referencias

- Agbna, G. H. D., & Zaidi, S. J. (2025). Hydrogel Performance in Boosting Plant Resilience to Water Stress—A Review. *Gels*, 11(4), 276. <https://doi.org/10.3390/gels11040276>
- A, H., Sofini, S. P. S., Balasubramanian, D., Girigoswami, A., & Girigoswami, K. (2024). Biomedical applications of natural and synthetic polymer based nanocomposites. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 35(2), 269–294. <https://doi.org/10.1080/09205063.2023.2283910>
- Batool, Z., Muhammad, G., Iqbal, M. M., Aslam, M. S., Raza, M. A., Sajjad, N., Abdullah, M., Akhtar, N., Syed, A., Elgorban, A. M., Al-Rejaie, S. S., & Shafiq, Z. (2022). Hydrogel assisted synthesis of gold nanoparticles with enhanced microbicidal and in vivo wound healing potential. *Scientific Reports*, 12(1), 6575. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10495-3>
- Buenger, D., Topuz, F., & Groll, J. (2012). Hydrogels in sensing applications. *Progress in Polymer Science*, 37(12), 1678–1719. <https://doi.org/10.1016/j.propolymsci.2012.09.001>
- Correa, S., Grosskopf, A. K., Lopez Hernandez, H., Chan, D., Yu, A. C., Stapleton, L. M., & Appel, E. A. (2021). Translational Applications of Hydrogels. *Chemical Reviews*, 121(18), 11385–11457. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c01177>
- Croitoru, A.-M., Fikai, D., & Fikai, A. (2024). Novel Photothermal Graphene-Based Hydrogels in Biomedical Applications. *Polymers*, 16(8), 1098. <https://doi.org/10.3390/polym16081098>
- Estrada, R., Soriano, J. G., & Sánchez, B. Leonor. (2023). “Síntesis de materiales nanocompuestos con nanopartículas de oro y copolímeros de acrilamida”. BUAP.
- Feng, S., Peng, X., Cui, J., Feng, R., Sun, Y., Guo, Y., Lu, Z., Gao, W., Liu, F., Liang, C., Hu, G., & Zhang, B. (2024). Photo Switchable 4D Printing Remotely Controlled Responsive and Mimetic Deformation Shape Memory Polymer Nanocomposites. *Advanced Functional Materials*, 34(28). <https://doi.org/10.1002/adfm.202401431>

- Guo, W., Lu, C., Orbach, R., Wang, F., Qi, X., Cecconello, A., Seliktar, D., & Willner, I. (2015). pH-Stimulated DNA Hydrogels Exhibiting Shape Memory Properties. *Advanced Materials*, 27(1), 73–78. <https://doi.org/10.1002/adma.201403702>
- Hu, J., Liu, X., Gao, Q., Ouyang, C., Zheng, K., & Shan, X. (2023). Thermosensitive PNIPAM-Based Hydrogel Cross-linked by Composite Nanoparticles as Rapid Wound-Healing Dressings. *Biomacromolecules*, 24(3), 1345–1354. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.2c01380>
- Hu, Y., Zhang, Z., Li, Y., Ding, X., Li, D., Shen, C., & Xu, F. (2018). Dual-Crosslinked Amorphous Polysaccharide Hydrogels Based on Chitosan/Alginate for Wound Healing Applications. *Macromolecular Rapid Communications*, 39(20). <https://doi.org/10.1002/marc.201800069>
- Iresha, H., & Kobayashi, T. (2020). Smart Polysaccharide Hydrogels in Drug Delivery and Release (pp. 135–149). https://doi.org/10.1007/978-3-030-46923-8_6
- Jayaramudu, T., Ko, H.-U., Kim, H. C., Kim, J. W., & Kim, J. (2019). Swelling Behavior of Polyacrylamide–Cellulose Nanocrystal Hydrogels: Swelling Kinetics, Temperature, and pH Effects. *Materials*, 12(13), 2080. <https://doi.org/10.3390/ma12132080>
- Jung, K., Corrigan, N., Wong, E. H. H., & Boyer, C. (2022). Bioactive Synthetic Polymers. *Advanced Materials*, 34(2). <https://doi.org/10.1002/adma.202105063>
- Kim, S. J., Lee, K. J., Kim, I. Y., & Kim, S. I. (2003). Swelling Kinetics of Interpenetrating Polymer Hydrogels Composed of Poly(Vinyl Alcohol)/Chitosan. *Journal of Macromolecular Science, Part A*, 40(5), 501–510. <https://doi.org/10.1081/MA-120019888>
- Kwiecień, I., & Kwiecień, M. (2018). Application of Polysaccharide-Based Hydrogels as Probiotic Delivery Systems. *Gels*, 4(2), 47. <https://doi.org/10.3390/gels4020047>
- Liu, D., Huyan, C., Wang, Z., Guo, Z., Zhang, X., Torun, H., Mulvihill, D., Xu, B. Bin, & Chen, F. (2023). Conductive polymer based hydrogels and their application in wearable sensors: a review. *Materials Horizons*, 10(8), 2800–2823. <https://doi.org/10.1039/D3MH00056G>

- M. Aguilar, N., Perez-Aguilar, J. M., González-Coronel, V. J., Martínez-Gutiérrez, H., Zayas Pérez, T., Soriano-Moro, G., & Sanchez-Gaytan, B. L. (2022). Hydrolyzed Polyacrylamide as an In Situ Assistant in the Nucleation and Growth of Gold Nanoparticles. *Materials*, 15(23), 8557. <https://doi.org/10.3390/ma15238557>
- Morozov, Y. M., Wiesner (née Diehl), F., Grün, J. J., Pertiller, M., Fossati, S., Schmidt, K., Quilis, N. G., Gusenbauer, C., Zbiral, B., Toca-Herrera, J. L., Klees, S., Thiagarajan, C. R. V., Jonas, U., & Dostalek, J. (2024). Microstructuring of Thermoresponsive Biofunctional Hydrogels by Multiphoton Photocrosslinking. *Advanced Functional Materials*, 34(26). <https://doi.org/10.1002/adfm.202315578>
- Roy, A., Manna, K., & Pal, S. (2022). Recent advances in various stimuli-responsive hydrogels: from synthetic designs to emerging healthcare applications. *Materials Chemistry Frontiers*, 6(17), 2338–2385. <https://doi.org/10.1039/D2QM00469K>
- Sapula, P., Bialik-Was, K., & Malarz, K. (2023). Are Natural Compounds a Promising Alternative to Synthetic Cross-Linking Agents in the Preparation of Hydrogels? *Pharmaceutics*, 15(1), 253. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15010253>
- Sharma, P., & Singh, B. (2024). Preparation and drug delivery of hydrogels based on grafting of methacrylamide (MAAm) / vinylsulphonic acid (VSA) co monomers onto psyllium. *Hybrid Advances*, 6, 100224. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2024.100224>
- Vijayavenkataraman, S., Vialli, N., Y. H. Fuh, J., & Lu, W. F. (2024). Conductive collagen/polypyrrole-b-polycaprolactone hydrogel for bioprinting of neural tissue constructs. *International Journal of Bioprinting*, 5(1), 229. <https://doi.org/10.18063/ijb.v5i2.1.229>
- Wang, Y., Nian, G., Kim, J., & Suo, Z. (2023). Polyacrylamide hydrogels. VI. Synthesis-property relation. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 170, 105099. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2022.105099>
- Wu, C.-J., Gaharwar, A. K., Schexnailder, P. J., & Schmidt, G. (2010). Development of Biomedical Polymer-Silicate Nanocomposites: A Materials Science Perspective. *Materials*, 3(5), 2986–3005. <https://doi.org/10.3390/ma3052986>

MATEMÁTICAS EN LA NATURALEZA

MATHEMATICS IN NATURE

Maria Corazón Flores Bautista *¹
Ernesto Chigo Anota¹
Jacinto Flores Minor²
Elena Letras Luna³

1 Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Facultad de Ingeniería Química. Área de materiales: química teórica computacional. Ciudad Universitaria. Puebla. México. C.P. 72570.

2 Tecnológico Nacional de México, ITS-Apizaco, Av. Instituto Tecnológico No. 418, San Andrés Ahuashuatepec, Municipio de Tzompantepec, Tlaxcala. C.P. 90491, México.

3 Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Facultad de Ciencias Químicas. ICUAP. Departamento de Biología y Toxicología de la Reproducción. Ciudad Universitaria. Puebla. México. C.P. 72570.

Correos:
corazon.flores@alumno.buap.mx
ernesto.chigo@correo.buap.mx
jacinto.fm@apizaco.tecnm.mx
dulce.letras@alumno.buap.mx

Folio: A11N105.25/1021

Resumen

Las matemáticas están profundamente presentes en la naturaleza, manifestándose en patrones como la simetría, los fractales y las formas geométricas que se observan tanto en organismos vivos como en estructuras inorgánicas. Sin embargo, mientras que en las ciencias las leyes matemáticas son altamente efectivas, en la biología su aplicación es más limitada debido a la complejidad y creatividad inherentes a los sistemas vivos, lo que ha llevado a buscar nuevos enfoques y modelos más flexibles. Las matemáticas siguen siendo esenciales para entender procesos como la evolución, la ecología y la predicción de cambios ambientales. Además, la educación que integra matemáticas y naturaleza fomenta la conciencia ambiental y el pensamiento crítico, mostrando la utilidad de las matemáticas en la vida cotidiana y en la resolución de problemas reales. Las matemáticas no solo revelan el orden subyacente en la naturaleza, sino que también inspiran arte, ciencia y educación, aunque sus límites en ciertos campos invitan a expandir y adaptar sus métodos.

Palabras clave: Matemáticas, naturaleza, ciencia, patrones, pensamiento, resolución.

Abstract

Mathematics is deeply embedded in nature, manifesting itself in patterns such as symmetrical, fractals, and geometric shapes observed in both living organisms and inorganic structures. However, while mathematical laws are highly effective in science, their application in biology is more limited due to the inherent complexity and creativity of living systems, which has led to the search for new approaches and more flexible models. Mathematics is essential for understanding processes such as evolution, ecology, and predicting environmental change. Likewise, education that integrates mathematics and nature fosters environmental awareness and critical thinking, demonstrating the usefulness of mathematics in everyday life and in solving real-world problems. Mathematics not only reveals the underlying order in nature but also inspires art, science, and education, although its limitations in certain fields invite us to expand and adapt its methods.

Keywords: Mathematics, nature, science, patterns, thinking, solving.

Introducción

En la naturaleza se pueden observar numerosos patrones (secuencias) matemáticos, desde la posición de las hojas en un tallo hasta la forma de los copos de nieve. Estos patrones se manifiestan en diversas formas, incluyendo la secuencia de Fibonacci, la proporción áurea, fractales y espirales, entre otros. Una sucesión es una lista ordenada de objetos (denominados términos, elementos o miembros). A diferencia de un conjunto, el orden en que aparecen los términos es relevante y un mismo término puede aparecer en más de una posición. En algunos casos este tipo de listas ordenadas aparecen en la naturaleza. Uno de los ejemplos más famosos es la sucesión de Fibonacci. La secuencia de Fibonacci es una serie de números donde cada número es la suma de los dos anteriores (1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, etc.). Fue descrita en Europa por Leonardo de Pisa, matemático italiano del siglo XIII también conocido como Fibonacci. Esta secuencia se encuentra en la naturaleza, por ejemplo, en la disposición de las hojas alrededor de un tallo, en la estructura de las piñas y en la forma de las flores de girasol.

Los fractales son patrones que se repiten a diferentes escalas, como en las ramificaciones de los árboles o en la estructura de los helechos.

Las espirales son otro patrón común, como se ve en las conchas marinas, en los huracanes y en las galaxias. Además de estos, existen otros patrones matemáticos presentes en la naturaleza, como las simetrías (ej. simetría bilateral en animales), los mosaicos (ej. la piel de algunos animales) y las ondas (ej. las olas del mar) que ayudan a dilucidar estructuras y fenómenos desde un punto de vista científico (Livio, 2003). La comprensión de estos patrones matemáticos en la naturaleza no solo nos permite apreciar la belleza y complejidad del mundo natural, sino que también puede inspirar aplicaciones en diversas áreas, como la arquitectura, el diseño y la ciencia.



Figura 1. Animales que presentan una variedad de patrones. <https://es.knowablemagazine.org/content/articulo/mundo-viviente/2024/como-obtienen-los-animales-sus-patrones>

Desarrollo

El propósito de los modelos matemáticos es proponer una aproximación relativamente sencilla que asemeje los fenómenos que ocurren en la naturaleza. A través de una descripción matemática se logran obtener patrones que empatan con los observados en la naturaleza. Sin embargo, la utilidad de estos modelos radica en que pueden servir como una base para diseñar los experimentos pertinentes y los resultados de estos servirán para apoyar, actualizar o descartar el modelo.

Los patrones como las espirales, redes ramificadas y la simetría se encuentran en organismos vivos, formaciones geológicas e incluso en estructuras cósmicas, lo que sugiere que la matemática es una herramienta fundamental para entender los procesos naturales (Murray, 2018). Las proporciones entre números consecutivos de la sucesión se aproximan a la proporción áurea (~1.618), una constante que se manifiesta en la forma de espirales logarítmicas en conchas, galaxias y estruc-



Figura 2. Aproximación de la espiral áurea que se manifiesta en la naturaleza. (Sanni y Oyetoro 2024)

turas florales (Sanni & Oyetoro, 2024). El número áureo o de oro es un número irracional surge de la división en dos de un segmento ab guardando las siguientes proporciones: La longitud total $a+b$ es al segmento más largo a , como a es al segmento más corto b . Se suele representar con la letra griega ϕ (fi) en honor al escultor Griego Fidias.

Esta relación se encuentra tanto en algunas figuras geométricas como en la naturaleza, por ejemplo, en las nervaduras de las hojas de algunos árboles, en el grosor de las ramas, en el caparazón de un caracol y en los flósculos de los girasoles. Asimismo, se atribuye un carácter estético a los objetos cuyas medidas guardan la proporción áurea. A lo largo de la historia, se ha atribuido su inclusión en el diseño de diversas obras de arquitectura y otras artes, aunque algunos de estos casos han sido cuestionados por los estudiosos de las matemáticas y el arte.

La geometría sagrada se refiere a patrones y proporciones geométricas que aparecen en la naturaleza, el arte y la arquitectura, y que se cree que tienen un significado simbólico y espiritual. Estas formas y proporciones se consideran sagradas porque se piensa que reflejan la armonía y el orden del universo, conectando lo divino con lo material y que han sido considerados durante milenios como base de la creación (Darshan y Alabama. 2022).

Un fractal es un objeto geométrico cuya estructura se repite a diferentes escalas, mostrando autosimilitud, es decir, cada parte se parece al todo. Esta propiedad implica que, al observar un fractal con mayor o menor aumento, se revela la misma estructura básica. Los fractales se encuentran en la naturaleza, como en las ramificaciones de un árbol o las crestas de las montañas, y también son objetos de estudio en matemáticas y otras disciplinas (Csapi y otros. 2024). Los fractales, como el conjunto de Mandelbrot, son formas



Figura 3. Geometría sagrada en las obras de arte. (Darshan y otros, 2022)



Figura 4. Fractales presentes en los copos de nieve. (pixabay, 2022)

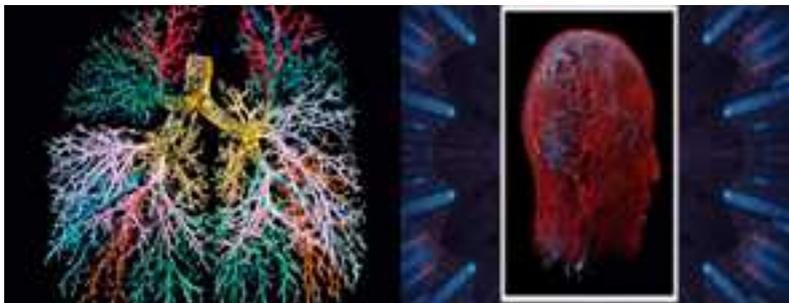


Figura 5. Fractales presentes en los sistemas biológicos como los pulmones y el sistema nervioso cerebral. (ingenierosdelavida, 2019).

geométricas que se repiten a diferentes escalas. Estos se encuentran en las ramificaciones de los árboles y en la estructura de las costas.

El estudio de los fractales también está íntimamente ligado a la teoría del caos, que explica cómo sistemas dinámicos pueden ser sensibles a las condiciones iniciales, y que aparentemente crear estructuras aleatorias (como los patrones caleidoscópicos) (Mandelbrot, 1982).

Las redes de telecomunicaciones que imitan estructuras fractales son más eficientes en la transmisión de señales, reduciendo la pérdida de datos y mejorando la cobertura en áreas urbanas complejas (Stevens, 2008). También se observó que la mayoría de los sistemas biológicos, como los pulmones humanos, las ramas de los árboles y los sistemas fluviales, siguen una Estructura fractal (Mandelbrot, 1982). Estas estructuras, que replican la naturaleza autosimilar de los árboles o el sistema nervioso, permiten una mayor redundancia sin pérdida de conectividad.

Un patrón es un objeto recurrente, como por ejemplo el dibujo de un estampado o un mosaico. Estos elementos se repiten de una manera predecible. Pueden generarse a partir de una plantilla o un modelo. Los patrones más básicos, llamados teselaciones, se basan en la repetición y la periodicidad. Una única plantilla, azulejo o célula, se combina mediante duplicados sin cambios o modificaciones (Sawyer, 1996).

En la naturaleza se pueden encontrar diversos paisajes, estructuras y pelajes de animales dispuestos de manera similar a un patrón matemático. Por ejemplo, las manchas de un leopardo parecen seguir un modelo que define el dibujo, no es una disposición caótica. O también en los movimientos de determinados grupos de animales se pueden observar patrones distinguibles por el ojo humano. El origen de estos patrones es, en muchos casos, desconocido. Aunque algunas veces tiene una explicación geológica o química, como es el caso de las rayas de los mamíferos.

El genial matemático inglés Alan Turing, fue un pionero en las ciencias de la computación y la inteligencia artificial padre de la computación moderna, propuso en la década de 1950 una idea sobre la formación de algunos patrones biológicos, como las rayas del tigre o las manchas del leopardo. Según Turing, esta repetición de patrones está generada por un par de unos productos químicos llamados morfógenos que trabajan con un activador y un inhibidor. La idea sobre la morfogénesis es que dos sustancias a las que denominó morfógenos reaccionan y se difunden a través de un tejido. Partiendo de un sistema homogéneo, al introducir una inestabilidad se da lugar a patrones o estructuras por medio de un rompimiento de simetría. Finalmente, se llega a una nueva distribución no homogénea pero ordenada, una nueva simetría (Mandelbrot, 2011).

La simetría es una característica de formas geométricas, sistemas, ecuaciones y otros objetos materiales y entidades abstractas, relacionada con su invariancia bajo ciertas transformaciones, movimientos o intercambios. Un ejemplo sencillo es la simetría axial, es decir, alrededor de un eje, como el que presenta el cuerpo humano, una hoja, cualquier polígono regular o la imagen a uno y otro lado del espejo. La simetría se observa en muchos organismos vivos. De hecho, se puede decir que es una propiedad distintiva de la naturaleza. A simple vista podemos observar en las flores y en los animales. También, aunque no podamos verla, está presente en fenómenos cuánticos del mundo atómico y subatómico.

De hecho, muchos científicos afirman que la física moderna, desde lo más pequeño a lo más grande, es decir, desde los átomos,

los quarks o los núcleos, pasando por lo molecular en estado sólido, hasta la estructura misma del universo, requiere del concepto de simetría para su comprensión. En biología la simetría corresponde a una distribución equilibrada en el cuerpo de los organismos de aquellas partes que aparecen duplicadas. Por ejemplo, los seres humanos son simétricos respecto a un eje vertical que divide en forma simétrica respecto a una recta. La mayoría de las especies animales tiene simetría bilateral, aunque hay especies como los erizos y las estrellas de mar que presentan simetría radial secundaria. La simetría bilateral permite la definición de un eje corporal en la dirección del movimiento, lo que favorece la formación de un sistema nervioso centralizado y la cefalización.

Una forma de cubrir un plano es usando mosaicos, los cuales se elaboran con pequeños patrones de diversas formas y colores llamadas teselas, unidas forman composiciones decorativas geométricas o figurativas. Al juntar los mosaicos, sin superponerse, es decir que no quedan huecos entre ellos forma una teselación. La teselación regular es aquella que utiliza un sólo tipo de polígono regular. Sólo los triángulos equiláteros, los cuadrados y los hexágonos pueden formar este tipo de teselación. La suma de los ángulos de las formas geométricas acomodadas alrededor de un punto debe sumar 360° . Y la teselación semi-regular es aquella que se forma con dos o más polígonos regulares, de modo que sigue el mismo orden en cada vértice. Sólo 8 combinaciones cumplen con las condiciones de este tipo de teselación. Las teselaciones tienen aplicaciones en diversos campos, como: arquitectura y diseño, ya que se utilizan para crear patrones decorativos en suelos, paredes, techos y otros elementos



Figura 6. Simetría en diversos sistemas biológicos (sabermas, 2009).

arquitectónicos. En el arte se han creado patrones visualmente interesantes y complejos. Mientras que en la computación se utiliza en gráficos por computadora para subdividir superficies en mallas más finas para mejorar el detalle visual (píxeles) (Rodríguez, M, 2010).

Existen otros sistemas capaces de generar patrones como es el modelo de Gray-Scott, en el cual uno de los reactivos se transforma en un producto inerte mientras que su interacción con el otro reactivo genera más de este mismo reactivo; los patrones resultantes son sorprendentemente más

complejos y su comportamiento puede llevar a múltiples resultados simplemente ajustando los parámetros del sistema. Sistemas similares al modelo de Gierer-Meinhardt asemejan estrechamente patrones observados en otros organismos vivos. La razón por la que esto sucede es que la linealización del sistema en la que se consideran sólo términos de primer orden en las derivadas ya no será válida en todo el dominio espacial. En ciertos puntos de la región será necesario realizar un análisis local en el cual se considere el comportamiento de términos de orden superior.



Figura 7. Teselación hexagonal de un panal de abejas (belleza natural, 2019).

Conclusiones

A lo largo de la historia se ha demostrado que las matemáticas no solo son una herramienta analítica sino también una parte integral de la estructura de la naturaleza; donde los patrones precisos presentes en el ambiente no son meramente decorativos o estéticos, sino que desempeñan un papel fundamental en la funcionalidad y eficiencia de los sistemas tanto naturales como artificiales. Los patrones matemáticos se encuentran en todas las escalas, desde organismos microscópicos hasta

estructuras macroscópicas. Los avances en ingeniería se inspiran en estos patrones han llevado a mejoras significativas en diversos campos; Desde la arquitectura hasta las redes de las Inter telecomunicaciones. Explorar nuevas aplicaciones de los diversos patrones matemáticos permiten el diseño estructural y la optimización de materiales. Así como el desarrollo de nuevas metodologías para implementar algoritmos que permitirán la optimización de sistemas industriales, logísticos e incluso biológicos.

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.

Conflicto de interés

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

Agradecimientos

Especiales agradecimientos al Cuerpo Académico de Ingeniería en Materiales (BUAP-CA-177) y la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado (Beca: 100378777-VIEP2021).

Referencias

- Csapi, V., ULBERT, J. y TÓTH-PAJOR, Á. Proporción áurea-apalancamiento basado en un objetivo Dakota del Norte El desempeño ESG de las empresas cotizadas en EE. UU. y Europa. *Investigación en Negocios Internacionales y Finanzas*, 71(102469), 102469. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ribaf.2024.102469>
- Bosquez-Mestanza A. L. Nieto Cañarte C. A. Guamán-Sarango A. M. Calle-Ruiz C. A. Análisis de métodos y patrones matemáticos encontrados en la naturaleza y sus interacciones con la ingeniería. *2024 Brazilian Applied Science Review* 8(2):e73744. DOI: 10.34115/basrv8n2-007
- Livio, M. La proporción áurea: La stTeoría de Phi, el número más asombroso del mundo. *Broadway Books*. 304. 2003. ISBN: 978-0-767-90815-3.
- Mandelbrot, BB La geometría fractal de la naturaleza. William Henry Freeman y Compañía. 1982. ISBN 0-7167-1186-9.
- Mandelbrot, BB La geometría fractal de la naturaleza. William Henry Freeman y Compañía. Una introducción. 2011. Ediciones UIES. ISBN 0-7167-1186-8.
- Murray, C. Patrones en la naturaleza Claro: por qué el mundo natural luce como luce. *Reseñas de cristalografía*, 24(3), 205-206. 2018. <https://doi.org/10.1080/0889311x.2018.1447569>.
- Rodríguez, M. (2010). *Generación de teselaciones periódicas: Grupos Cristalográficos*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
- Sawyer. W. Does mathematics rest fact? Citado por Abrantes. P. en revista uno, V 8. "El papel de la resolución de problemas en un contexto de innovación curricular". P.10 y 11. Barcelona. Graó, 1996.

ANÁLISIS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO. (1986-2016)

ANALYSIS ON AIR POLLUTION IN THE MEXICO CITY
METROPOLITAN AREA. (1986-2016)

Enrique Rodolfo Bazúa Rueda

UNAM, Facultad de Química, Departamento de Ingeniería Química (jubilado desde octubre de 2019),
Asesor académico permanente de Los Laboratorios 301, 302 y 303 de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental (1985 a la fecha)
Conjunto E, Edificios E-2 Ingeniería Química y E-3 Alimentos y Química Ambiental,
Circuito de la Investigación Científica s/n,
Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510 Ciudad de México, México.

Correos:
erbr@quimica.unam.mx
erbr@unam.mx

<https://orcid.org/0000-0002-3006-3761>

FOLIO: A11N107.25/1023

Resumen

En este documento se abordaron los siguientes temas: El índice Metropolitano de la Calidad del Aire, la problemática de la antigua cuenca lacustre que hoy es la zona metropolitana del valle de México así como los programas que hay para mejorar la calidad de su atmósfera, la presencia del azufre congénito en las gasolinas y el caso de la verificación vehicular instaurada en los últimos años del siglo XX así como el seguimiento atmosférico de los contaminantes en esa esfera ambiental. Esta primera parte abordó los años 1986-2016. En la segunda parte se abordará la problemática de la formación de ozono a lo largo de los años 2016-2024, que sigue sin resolverse. Se dieron en esta primera parte algunas pautas para conducir a las autoridades metropolitanas hacia el objetivo superior de alcanzar una calidad de aire mejor para los mexicitadinos y sus vecinos que, desafortunadamente, no fueron tomadas en cuenta y por ello siguen las contingencias por ozono troposférico.

Palabras clave: Zona Metropolitana del Valle de México, calidad atmosférica, verificación vehicular, Programa Hoy No Circula.

Abstract

In this document, the following topics were addressed: The Metropolitan Air Quality Index, the problems of the old lake basin that is today the metropolitan area of the Valley of Mexico, as well as the programs that exist to improve the quality of its atmosphere, the presence of congenital sulfur in gasoline and the case of vehicle verification established in the last years of the 20th century as well as atmospheric monitoring of pollutants in that environmental sphere. This first part addressed the years 1986-2016. The second part will address the problem of ozone formation over the years 2016-2024, which remains unresolved. Some guidelines were given in this first part to guide metropolitan authorities towards the higher objective of achieving better air quality for the residents of Mexico City and their neighbors, which, unfortunately, were not taken into account, and therefore, the contingencies due to tropospheric ozone continue.

Keywords: Metropolitan Zone of the Valley of Mexico, atmospheric quality, vehicle verification, "Hoy No Circula" Program.

Introducción

La antigua cuenca lacustre de México encontrada por los conquistadores españoles a principios del siglo XVI como una zona de ensueño se ha convertido en una de las megalópolis del Planeta Tierra, con todos los problemas ambientales que esto conlleva. En este documento se abordará la contaminación atmosférica de la ahora llamada Zona Metropolitana del Valle de México. Este documento está dividido en cuatro partes:

- **IMECA** (Índice Metropolitano de la Calidad del Aire)
- Problemática y Programas
- Azufre en gasolinas
- Verificación vehicular y monitoreo atmosférico de contaminantes

La Zona Metropolitana del Valle de México tiene aproximadamente 3,540 km² (Figura 1) y, además de la actual Ciudad de México, incluye municipios denominados conurbados.

De acuerdo con el documento del Centro Molina para Energía y Ambiente de la

Ciudad de México, “Evaluación costo beneficio de la mejora en la calidad de los combustibles automotrices en el país”, publicado en diciembre de 2005, las emisiones a la atmósfera como contaminantes y sus efectos principales se encuentran en la Figura 2. En esta figura el autor destaca los contaminantes de criterio para lo que se denominó IMECA a finales del Siglo Veinte, Índice Metropolitano de la Calidad del Aire: Monóxido de carbono, CO, ozono, óxidos de nitrógeno, NOx, dióxido de azufre, SO₂, así como material particulado, por sus siglas en inglés *PM* (*particulate matter*), de 10 y de 2.5 micrómetros de diámetro nominal (no son necesariamente esféricas). La figura está dividida en tres partes, la “columna” izquierda indica las emisiones, la central tiene el tipo de contaminante que, si se forma de manera directa se le llama primario o si se crea ya en la atmósfera a causa de las reacciones químicas de los contaminantes de la primera “columna” se le llama secundario y la derecha los efectos que causan. Es importante mencionar que cuando se creó este índice todavía estaba el plomo, derivado de la adición a las gasolinas de un “supercontaminante”, del tetraetilo de plomo.

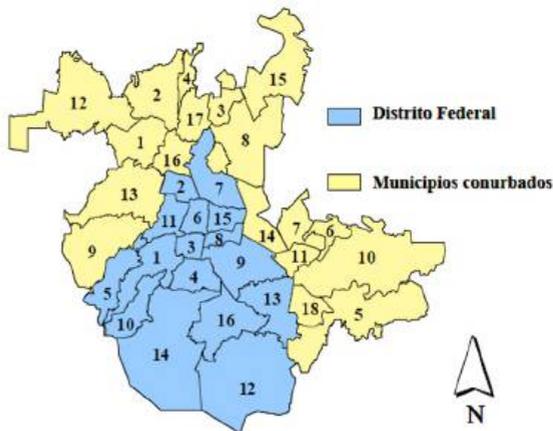


Figura 1a. Zona Metropolitana del Valle de México (acceso libre)

¹La palabra conurbado no existe en español, solamente conurbación, del inglés conurbation. 1. Palabra femenina. Conjunto de varios núcleos urbanos inicialmente independientes y contiguos por sus márgenes que, al crecer, acaban formando una unidad funcional (<https://dle.rae.es/conurbaci%C3%B3n?m=form>) [Real Academia Española © Todos los derechos reservados]

	Delegación	Superficie * (km ²)
1	Álvaro Obregon	95.9
2	Azcapotzalco	33.7
3	Benito Juárez	26.5
4	Coyoacán	53.9
5	Cuajimalpa	70.8
6	Cuauhtémoc	35.5
7	Gustavo A. Madero	88.1
8	Iztacalco	23.2
9	Iztapalapa	113.5
10	M. Contreras	63.5
11	Miguel Hidalgo	46.3
12	Milpa Alta	287.5
13	Tláhuac	86.3
14	Tlalpan	308.7
15	Venustiano Carranza	33.8
16	Xochimilco	119.2
	Total	1,486.4

Figura 1b. Ciudad de México y sus demarcaciones territoriales (acceso libre)

	Delegación	Superficie * (km ²)
1	Álvaro Obregon	95.9
2	Azcapotzalco	33.7
3	Benito Juárez	26.5
4	Coyoacán	53.9
5	Cuajimalpa	70.8
6	Cuauhtémoc	35.5
7	Gustavo A. Madero	88.1
8	Iztacalco	23.2
9	Iztapalapa	113.5
10	M. Contreras	63.5
11	Miguel Hidalgo	46.3
12	Milpa Alta	287.5
13	Tláhuac	86.3
14	Tlalpan	308.7
15	Venustiano Carranza	33.8
16	Xochimilco	119.2
	Total	1,486.4

Figura 1c. Municipios conurbados pertenecientes al estado de México (acceso libre)

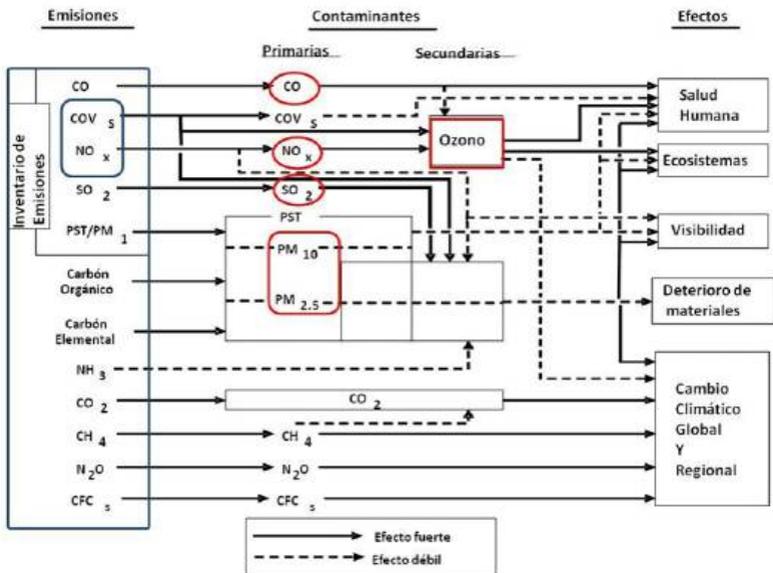


Figura 2. Emisiones a la atmósfera como contaminantes y sus efectos principales (cortesía del Centro Molina para Energía y Ambiente de la Ciudad de México)

Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA)

En 1982 se diseñó el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA), cuya metodología transforma a una escala adimensional las concentraciones de los **contaminantes criterio**. Su fundamento es el Índice Estándar de Contaminantes (Pollutant Standard Index o PSI por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos (EE.

UU.). Establece en 100 puntos el límite de protección a la salud para cada contaminante. El índice IMECA es proporcional a la concentración del contaminante en el aire (Tabla 1) (Red Automática de Monitoreo Atmosférico, RAMA, <http://www.aire.cdmx.gob.mx/>).

Tabla 1. Contaminantes de criterio considerados para calificar la calidad del air en forma proporcional

Calificativo de la calidad del aire	IMECA
Buena	0-50
Regular	51-100
Mala	101-150
Muy mala	151-200
Extremadamente mala	> 200

Calidad del aire	Mensajes de riesgos a la salud y acciones asociados a la calidad del aire (IMECA > 100 hay riesgo a la salud)
Buena 0 - 50	Adecuada para llevar a cabo actividades al aire libre
Regular 51 - 100	Posibles molestias en niños, adultos mayores y personas con enfermedades Se pueden llevar a cabo actividades al aire libre
Mala 101 - 150	Causante de efectos adversos a la salud en la población, en particular los niños y los adultos mayores con enfermedades cardiovasculares y/o respiratorias como el asma Evite las actividades al aire libre "Acuda al médico si presenta síntomas respiratorios o cardiacos"
Muy mala 151 - 200	Causante de mayores efectos adversos a la salud en la población general, en particular los niños y los adultos mayores con enfermedades cardiovasculares y/o respiratorias como el asma Evite salir de casa y mantenga las ventanas cerradas "Acuda al médico si presenta síntomas respiratorios o cardiacos"
Extremadamente mala > 200	Causante de efectos adversos a la salud de la población en general. Se pueden presentar complicaciones graves en los niños y los adultos mayores con enfermedades cardiovasculares y/o respiratorias como el asma Proteja su salud, evite salir de casa y mantenga las ventanas cerradas "Acuda al médico si presenta síntomas respiratorios o cardiacos" "No use el automóvil"

A continuación, en la Tabla 2, se presentan los límites máximos permisibles de protección a la salud establecidos por las

Normas Oficiales Mexicanas, NOM, que son de carácter obligatorio.

Tabla 2. Límites permisibles de protección a la salud que establecen las normas oficiales mexicanas

Contaminante	Norma Oficial Mexicana	Valor del Límite permisible IMECA = 100	Forma de integración al IMECA
PM ¹⁰ < 10 µm	NOM-025-SSA1-1993 NOM-025-SSA1-2014	120 µg/m ³ 75 µg/m ³	Promedio móvil de 24 horas
PM ^{2.5} < 2.5 µm	NOM-025-SSA1-1993 NOM-025-SSA1-2014	65 µg/m ³ 45 µg/m ³	Promedio móvil de 24 horas
O ₃ Ozono	NOM-020-SSA1-1993 NOM-020-SSA1-2014	0.110 ppm 0.095 ppm	Promedio de una hora
NO ₂	NOM-023-SSA1-1993	0.210 ppm	Promedio de una hora
SO ₂	NOM-022-SSA1-1993 NOM-022-SSA1-2010	0.130 ppm 0.110 ppm	Promedio móvil de 24 horas
CO	NOM-021-SSA1-1993	11 ppm	Promedio móvil de 8 horas

De acuerdo con el autor, valores límite menores ayudan a tomar acciones más tempranas para mejorar la calidad del aire (se activan las contingencias con concentraciones de contaminantes

menores). Asimismo, las contingencias ambientales se decretan por Ozono y/o Partículas, cuando la Calidad del Aire es "Muy Mala" (Figura 3).



Figura 3. Captura de pantalla del lunes 01 de agosto de 2016 por parte del autor

Problemática y Programas

Problemática

La orografía de la zona no favorece la dispersión de los contaminantes emitidos. La naturaleza la creó para que permaneciera prístina pero no contaba con los depredadores más agresivos que la naturaleza ha

creado, los *Homo sapiens* (Harari, 2020). La Figura 4 presenta este hecho, ahora convertido en problema, tomada de las autoridades de la Ciudad de México.

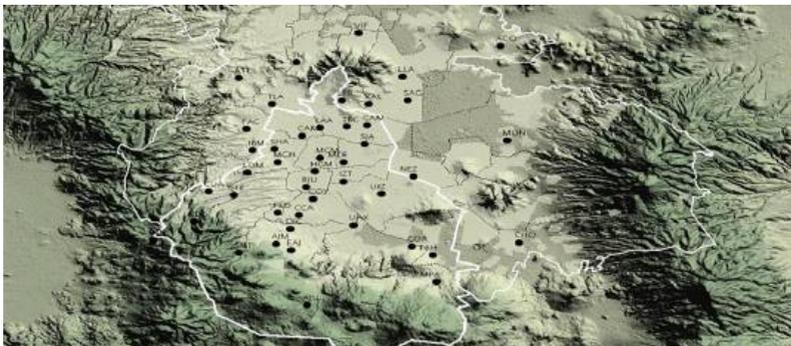


Figura 4. Orografía de la Zona Metropolitana del Valle de México donde los círculos negros son las Estaciones de la "Red Automática de Monitoreo Atmosférico" (RAMA) (<http://www.aire.cdmx.gob.mx/>)

Señala el autor que, en época de secas los vientos son desfavorables para la dispersión de los contaminantes, como puede verse en la Figura 5. La figura de la izquierda muestra claramente la dirección de los vientos hacia el sur mientras que la de la derecha se mantienen dando círculos alrededor de la zona centro norte de la ahora Ciudad de México que, tristemente, ha sido la zona más contaminada de la Ciudad de México, donde se asientan las

autoridades federales y las autoridades mexicitadinas desde hace muchos años. Sus empleados son quienes respiran con mayor intensidad estos contaminantes que se encuentran en la Zona Metropolitana del Valle de México así como todas las personas que visitan el famoso centro histórico de la otrora "Ciudad de los Palacios" (tomado de Durán-Domínguez-de-Bazúa, 2022) y la región más transparente del aire (tomado de Alfonso Reyes)".

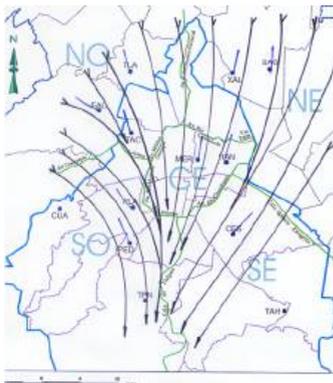


Figura 5a. Época de lluvias (acceso libre)



Figura 5b. Época de secas

Las fuentes móviles son los contribuyentes mayores para los precursores de ozono, aviones, autobuses, vehículos particulares, vehículos públicos, camiones de carga, etc. Algunos trenes solamente contaminan cuando llegan a circular y no contaminan los trolebuses que pueden

circular con electricidad cuando se conectan a ella y, afortunadamente, el sistema de transporte colectivo metropolitano que es eléctrico, el llamado "Metro". La Tabla 3 muestra el efecto sobre el ozono de estas fuentes móviles.

Tabla 3. Emisiones de contaminantes en la ZMVM por tipo de fuente (Inventario de emisiones de contaminantes y de efecto invernadero 2012, ZMVM, GDF 2013)

Precusores de ozono												
Fuente contaminante	Emisiones [t/año]											
	PM10	PM2.5	SO ₂	CO	NOX	COT	COV	NH ₃	Tóxicos	CN	CO ₂	
Puntuales	7,491	1,219	4,157	7,357	13,349	183,679	174,698	245	35,304	162	162	
Área	21,841	4,995	289	20,249	12,449	474,418	231,282	39,025	94,195	278	278	
Móviles	3,966	2,946	421	1,578,442	209,717	210,328	199,824	4,922	59,512	1,676	1,676	
Vegetación y suelos	1,379	291	N/A	N/A	3,617	26,944	26,944	N/A	6,804	N/S	N/A	
Total	34,677	9,451	4,867	1,606,048	239,132	895,369	632,748	44,192	195,815	2,116	49,503,010	
Emisiones [%]												
Puntuales	21.6	12.9	85.4	0.5	5.6	20.5	27.6	0.6	18.0	7.7	21.6	
Área	63.0	52.9	5.9	1.3	5.2	53.0	36.5	88.3	48.1	13.1	29.0	
Móviles	11.4	31.1	8.7	98.2	87.7	23.5	3.6	11.1	30.4	79.2	49.3	
Vegetación y suelos	4.0	3.1	N/A	N/A	1.5	3.0	4.3	N/A	3.5	N/S	N/A	
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
N/A. No Aplica- N/S No significativo												
Autos particulares	564	259	138	392,051	50,566	61,131	58,891	2,315	15,943	71	7,338,726	
Camionetas particulares SUV	165	79	57	157,039	17,808	21,193	20,229	635	5,462	22	3,114,078	
Taxis	240	110	56	302,387	39,204	24,949	24,034	980	7,548	30	2,776,898	
%Móviles					51.3	51.0	51.6					
%Total					45.0	12.0	16.3					

Señala el autor que la "piramidación" del parque vehicular es consecuencia de su renovación, especialmente del sector de la sociedad que puede tener varios automóviles y desea circular con todos ellos cualquier día de la semana (Tabla 4). También señala, de acuerdo con los valores de la NOM-042-SEMARNAT-2005

publicada en el Diario Oficial de la Federación el 07 de septiembre de 2005, que aplica para vehículos nuevos sus factores de emisión, lo que implica que contaminan menos pero contaminan (Tabla 5). Y, lo más grave, es que su número sigue en aumento ya que el sistema público es cada vez más insuficiente pues la población

de la ZMVM sigue en aumento en vez de disminuirse con la explosión inmobiliaria en zonas donde había casas habitación y ahora se construyen condominios verticales y horizontales aumentando los requerimientos de servicios comunita-

rios. Eso ocurre, sobre todo en algunas demarcaciones territoriales consideradas bastiones de la llamada clase media que son quienes pueden adquirir vehículos particulares (Tabla 6).

Tabla 4. Parque vehicular por año modelo y combustible en la ZMVM (Inventario de emisiones de contaminantes y de efecto invernadero 2012, ZMVM, GDF 2013)

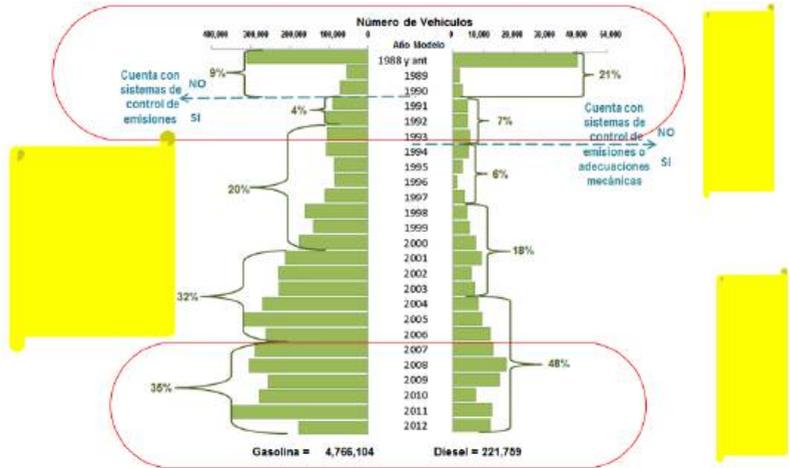


Tabla 5. Factores de emisión para automóviles particulares a gasolina en g/km (Inventario de emisiones de contaminantes y de efecto invernadero 2012, ZMVM, GDF 2013)

Modelo o año del vehículo	Compuestos orgánicos volátiles COV	Monóxido de carbono (CO)	Óxidos de nitrógeno (NOx)
1990	4.137	16.46	2.23
2000	2.127	12.12	1.64
2012	0.542	6.74	0.91
NOM	0.156	2.11	0.25

Tabla 6. Crecimiento del número de vehículos registrados, RVR, en la ZMVM en años-calendario (Inventario de emisiones de contaminantes y de efecto invernadero 2012, ZMVM, GDF 2013)

Año	1992	1994	1996	1998	2000	2002	2004	2006	2008	2010	2012
NVR	2,329,095	2,493,613	2,520,818	2,768,111	3,054,198	3,893,409	3,893,409	4,111,771	4,623,138	5,024,618	5,012,750

Algo interesante para el autor es que en este lapso el consumo de gasolina, que es el combustible más usado en los vehículos particulares, no ha aumentado sensiblemente (Figura 6). La conjetura del autor es que la estabilización de la

venta de gasolina, en contraposición con el incremento del parque vehicular, indica una saturación vehicular en el Valle de México y las personas no sacan todos sus automóviles a circular, sino que los tienen almacenados para las contingencias.

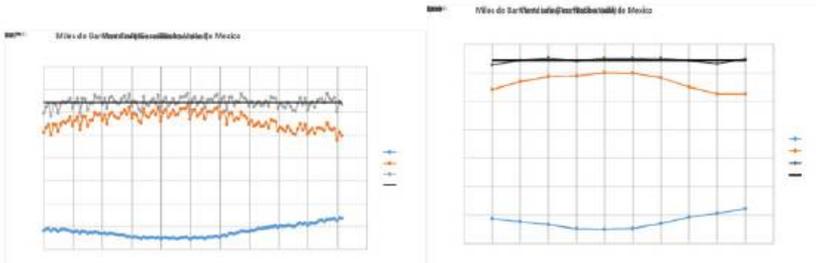


Figura 6. Venta de gasolina en el Valle de México 2006-2015 (INEGI, con datos de PEMEX, 2016)

Programas

Todos los programas hablan de buenas intenciones, pero poco se hace. Todo queda en el papel y la propaganda para ganar votos en épocas electorales.

Un ejemplo de ello, dentro de los programas destaca el PROAIRE 2011-2020 y a continuación en la Tabla 7 se presenta su eje rector y lineamientos estratégicos. El PROAIRE está constituido por 8 estrategias, mismas que contienen en total 81 medidas y 116 acciones.

Tabla 7. Eje Rector del PROAIRE: Establecer un enfoque ecosistémico en la gestión de la calidad del aire en la ZMVM

Estrategia 1	Ampliación y refuerzo de la protección a la salud
Estrategia 2	Disminución estructural del consumo energético de la ZMVM
Estrategia 3	Calidad y eficiencia energéticas en todas las fuentes
Estrategia 4	Movilidad y regulación del consumo energético del parque vehicular
Estrategia 5	Cambio tecnológico y de control de emisiones
Estrategia 6	Estrategia 6 Educación ambiental. Cultura de la sostenibilidad y participación ciudadana.
Estrategia 7	Manejo de áreas verdes, reforestación y naturación urbanas.
Estrategia 8	Fortalecimiento institucional e investigación.

Azúfre en gasolinas

El Centro Molina para Energía y Ambiente Ciudad de México, en su documento de diciembre de 2005 ya mencionado "Evaluación costo beneficio de la mejora en la calidad de los combustibles automotrices en el país" hizo una clasificación de las

tecnologías automotrices, especificaciones de combustibles y emisiones que se muestran en la Tabla 8. Es claro que ningún vehículo en México cumple con la NOM.

Tabla 8. Tecnologías automotrices disponibles para vehículos a gasolina y Diesel y sus emisiones

Categoría	Tecnología automotriz	Especificación Diesel ppm S	Especificación Gasolina ppm S	Emisiones de HC Tot (Aut part.) g/km
1	Mínimos requerimientos de control vehicular (Holograma: Dos)	3000	1000	6.255

2	Control de emisiones equivalentes a las normas Tier 0, Tier 1, Euro 1, Euro 2 (Holograma: Uno, Cero y 00)	300	200	(1) 3.59 (0) 1.047 (00) 0.308
3	Control de emisiones equivalentes a las normas US California, LEV, ULEV, Tier 2, Euro 3 y Euro 4	30	30	0.047
4	Avanzados sistemas de control de emisiones en NOx y PM, equivalentes a las normas US California LEV II y Euro 5	5-10	5-10	

Nota: El mismo Centro Molina para Energía y Ambiente Ciudad de México señala que, para 2020, si se usan gasolinas de ultrabajo azufre se tendrán mejores resultados (Figura 7) "con beneficios 2.4 veces superiores a los costos asociados" (sic del documento). Algo interesante es que el Dr. Francisco J. Barnés en entrevista personal con el autor señala que baja el azufre pero suben otros contaminantes.

ESCENARIO BASE
Incremento en las emisiones
2002 a 2020:

Hidrocarburos totales +23%
Óxidos de nitrógeno +43%
Monóxido de carbono + 9%

**ESCENARIO ULTRA BAJO
AZUFRE.**

Disminución en las emisiones en el
año 2020 respecto al escenario
base:

Hidrocarburos totales -52%
Óxidos de nitrógeno -64%
Monóxido de carbono -44%
Material particulado -55%



Figura 7. Reducción de emisiones por la introducción de gasolina y diésel de ultra bajo azufre (Centro Molina para Energía y Ambiente Ciudad de México, 2005: "Evaluación costo beneficio de la mejora en la calidad de los combustibles automotrices en el país")

Y se señalan dentro de las acciones para mejorar la calidad del aire las que aparecen en la Figura 8.

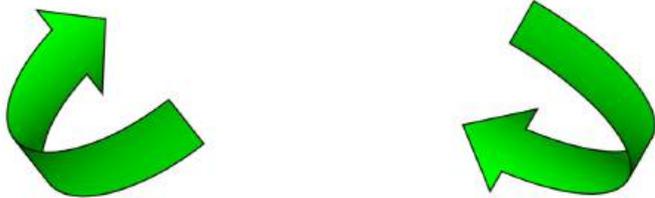
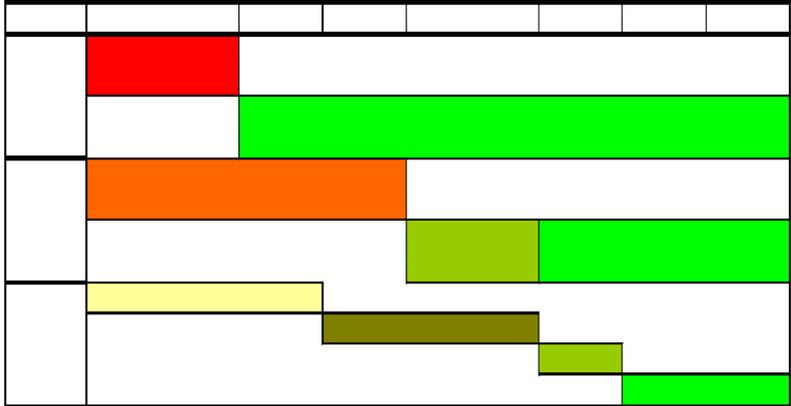


Figura 8. Acciones para tener un aire más limpio (limpio no lo permite la termodinámica)

El calendario propuesto para cumplirse completamente hace casi 15 años era el presentado en la Tabla 9 para la introducción de combustibles con bajo contenido de azufre (NOM-086-SEMARNAT-SENER-

SCFI-2005). Y, en 2015, anunció Pemex, **inversiones por 23 mil millones de dólares** (Comunicado de prensa, diciembre 8, 2015).

Tabla 9. Calendario para la introducción de combustibles con bajo contenido de Azufre (NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005)



1. **Proyecto GUBA.** Producción de gasolinas de ultra bajo azufre (UBA) en las seis refinerías del país, cuya inversión total ascenderá a 3 mil 100 millones de dólares con una producción final de más de 210 mil barriles diarios, **lo que permitirá reducir en más de 90 por ciento la emisión de gases de efecto invernadero y la emisión de contaminantes a la atmósfera.**
2. **Proyecto DUBA.** Proyecto de diesel de ultra bajo azufre se desarrollará en las seis refinerías con una inversión de 3 mil 900 millones de dólares para la construcción de 19 plantas nuevas y la modernización de 17 unidades externas, con lo cual se reducirán las importaciones de este combustible.
3. Pemex invertirá casi 5 mil millones de dólares para la **reconfiguración de la refinería de Tula**, con lo que se ampliará la capacidad de procesamiento de crudo en 25 mil barriles diarios para llegar a una capacidad instalada total de 340 mil barriles. Con ello, esta refinería ocupará el primer lugar en cuanto a capacidad de refinación en el país.
4. Los proyectos de las **reconfiguraciones de las refinerías de Salamanca y Salina Cruz** significarán una inversión adicional de 8 mil millones de dólares.
5. En el evento, Lozoya informó también sobre el avance de los cuatro primeros **proyectos de cogeneración** que desarrolla Petróleos Mexicanos a través de la empresa productiva subsidiaria Pemex Cogeneración y Servicios. Dichos proyectos, que representan una inversión superior a 3 mil millones de dólares y generarán 7 mil 300 empleos, se están realizando en las refinerías de Tula, Hidalgo; Cadereyta, Nuevo León, y Salina Cruz, Oaxaca, así como en el complejo procesador de gas de Cactus, Chiapas.

Verificación vehicular y monitoreo atmosférico de contaminantes

Los valores de criterio máximos del Programa de Verificación Vehicular obligatorio en la Ciudad de México, como se llama el Distrito Federal desde febrero de 2016, la concentración de contaminantes para obtener a) el holograma cero o doble cero, para los distintos semestres desde el año 2000 a la fecha se muestra en la Tabla 10

beneficiando a quienes tenían estos tipos de vehículos. Para los hologramas 1 y 2 los límites son desastrosos para la salud de quienes respiran el aire de la ZMVM. Con base en estos límites no resulta sorprendente que el ozono no se reduzca. Una muestra para 2015 obtenida de datos de la RAMA se presenta en la Tabla 11.

Tabla 10. Valores de criterio máximos del Programa de Verificación Vehicular para obtener: a) el holograma cero o doble cero, b) el holograma 1, c) el holograma 2 para modelos 1991 y posteriores, d) el holograma dos para modelos 1990 y anteriores, para los distintos semestres desde el año 2000 a la fecha ejemplificados con el inciso (a)

	Semestre	Hidrocarburos (HC) (ppm)*	Monóxido de Carbono (CO) (%vol.)	Óxido de nitrógeno (NO _x =NO+NO ₂) (ppm)	Oxígeno (O ₂) (%vol.)	Dilución		Lambada
						Mín.	Máx.	
						(CO+CO ₂) (%vol.)		
a)	2000-1	100	1.0	800	6.0	7	18	-
	2000-2 a 2004-1	100	1.0	1200	6.0	7	18	-
	2004-2 a 2007-1	100	1.0	1200	6.0	7	18	-
	2007-2 a 2008-2	50	0.4	800	3.0	13	16.5	1.05
	2009-1 a 2011-2	50	0.4	800	3.0	13	16.5	1.05
	2012-1 a 2014-1	100	0.6	1000	0.6	13	16.5	1.05
	2014-2 y 2015-1	100	0.6	1000	0.6	13	16.5	1.05
	2015-2	100	0.6	1000	0.6	13	16.5	1.05
	2016-1	100	0.6	1000	0.6	13	16.5	1.05
	2016-2	80	0.4	250	0.4	13	16.5	1.03
b)	2016-2	100	0.7	700	2.0	13	16.5	1.03
c)	2016-2	100	0.7	700	2.0	13	16.5	1.05
d)	2016-2	350	2.5	2000	2.0	13	16.5	1.05

Nota: Se subieron los límites al inicio del sexenio priísta 2012-2018 para (a) y se bajaron hasta el segundo semestre de 2016 a los que se tenían hasta 2011-2 para HC y CO, reduciendo realmente solamente a los NOx precursores de ozono hasta 2016-2 (de subirtos a 1000 y reducirlos a 250 ppm y el oxígeno de 3 a 0.6 y luego a 0.4% vol)

Tabla 11. Concentraciones de ozono (ppb) (muestra para enero de 2015) tomados de la base de datos de la RAMA (<http://www.aire.cdmx.gob.mx/>)

Fecha	Estaciones														Máxima horaria		Máxima en el día		
	Hora	ACO	AJM	AJU	ATI	BJU	CAW	CCA	CHO	COY	CUA	UAX	UIZ	VIF	XAL	Máx	Fecha	Máx	IMECA

01/01 /2015	1	4	8	20	21	-99	2	2	3	2	14	2	2	2	-99	26	SFE	01/01 /2015	108	114
01/01 /2015	2	5	2	31	16	-99	2	4	6	2	9	2	2	3	-99	31	AJU	01/01 /2015	48	51
01/01 /2015	3	6	3	26	10	-99	3	1	4	2	14	2	4	3	-99	26	AJU	01/01 /2015	43	45
01/01 /2015	4	7	6	17	7	-99	3	2	5	2	28	4	4	2	-99	28	CUA	01/01 /2015	68	72
01/01 /2015	5	6	2	20	5	-99	3	1	4	2	9	5	4	5	-99	21	SFE	01/01 /2015	36	38
01/01 /2015	6	6	4	21	6	-99	2	1	4	2	25	4	5	1	-99	25	CUA	01/01 /2015	47	49
01/01 /2015	7	4	27	16	5	-99	2	1	3	2	32	3	4	2	-99	32	CUA	01/01 /2015	60	63
01/01 /2015	8	5	26	12	4	-99	2	2	2	2	28	4	3	1	-99	28	CUA	01/01 /2015	52	55
01/01 /2015	9	6	19	14	9	-99	5	4	7	5	25	6	5	2	-99	25	CUA	01/01 /2015	76	80
01/01 /2015	10	18	35	28	26	-99	12	22	27	21	38	23	17	5	-99	40	SFE	01/01 /2015	82	86
01/01 /2015	11	41	58	32	49	-99	38	54	31	50	56	51	49	25	-99	60	SFE	01/01 /2015	104	109
01/01 /2015	12	49	79	34	66	-99	66	75	30	70	73	52	57	54	-99	80	SFE	01/01 /2015	121	127
01/01 /2015	13	51	83	34	81	-99	75	72	32	73	88	57	55	69	-99	97	SFE	01/01 /2015	132	139
01/01 /2015	14	54	37	37	74	-99	68	56	34	60	103	59	50	75	-99	108	SFE	01/01 /2015	110	116
01/01 /2015	15	50	38	42	98	-99	62	43	37	54	86	44	44	65	-99	99	FAC	01/01 /2015	122	128
01/01 /2015	16	46	39	42	93	-99	57	41	37	45	63	40	41	47	-99	93	ATI	01/01 /2015	113	119
01/01 /2015	17	47	38	39	61	-99	42	39	36	41	56	39	42	46	-99	66	AJM	01/01 /2015	111	117
01/01 /2015	18	40	35	40	42	-99	34	34	33	36	36	35	35	33	-99	42	AJM	01/01 /2015	102	107
01/01 /2015	19	30	37	29	15	-99	22	31	13	30	23	29	26	16	-99	37	AJM	01/01 /2015	95	100
01/01 /2015	20	18	35	18	6	-99	10	19	10	17	19	20	13	10	-99	35	AJM	01/01 /2015	119	125
01/01 /2015	21	7	30	12	6	-99	2	11	78	4	10	7	5	5	-99	30	AJM	01/01 /2015	92	97
01/01 /2015	22	3	32	8	14	-99	2	2	8	5	12	16	8	1	-99	32	AJM	01/01 /2015	66	69
01/01 /2015	23	3	33	14	3	-99	1	1	5	4	12	7	6	0	-99	33	AJM	01/01 /2015	76	80
01/01 /2015	24	3	32	15	3	-99	1	1	3	2	19	5	8	0	-99	32	AJM	01/01 /2015	73	77
02/01 /2015	1	2	32	16	5	-99	2	0	5	2	27	10	7	0	-99	32	AJM	02/01 /2015	86	91
02/01 /2015	2	3	31	10	6	-99	1	0	4	2	28	9	8	0	-99	31	AJM	02/01 /2015	93	98
02/01 /2015	3	2	20	11	5	-99	1	1	11	2	30	8	9	0	-99	31	SFE	02/01 /2015	92	97
02/01 /2015	4	2	28	17	4	-99	1	0	10	2	29	8	10	0	-99	29	CUA	02/01 /2015	68	72

Calidad del aire por ozono

El número de días del año en que se excedió la norma de 100 IMECA en la calidad del aire por ozono de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) de 1986 a la fecha, elaborada con la base de datos de la RAMA se presenta en la Figura 9. La tendencia decreciente, a partir de que se introdujo el Holograma

“0”, es una muestra de su eficacia, aunque debe mencionarse que las personas que no pueden adquirir los vehículos nuevos o seminuevos deben usar el transporte público al menos dos días a la semana y, en ocasiones, más días. Esto se ve gráficamente muy bien en la Figura 10.

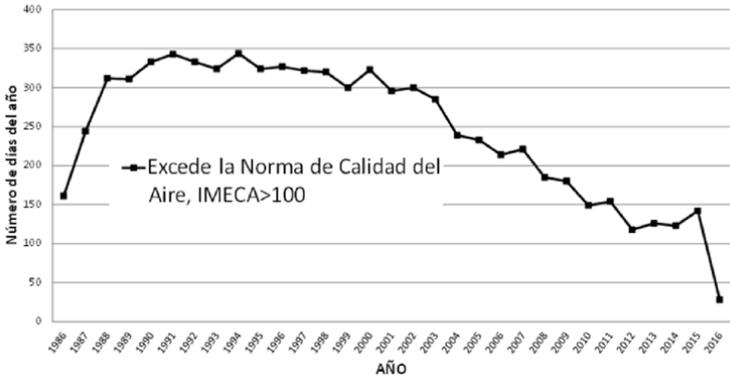


Figura 9. Número de días del año en que se excedió la norma de 100 IMECA en la calidad del aire por ozono de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) de 1986 a la fecha (<http://www.aire.cdmx.gob.mx/>)

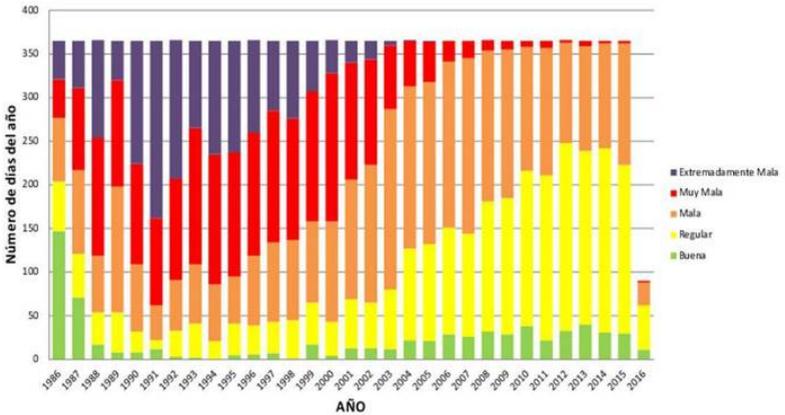


Figura 10. Los mismos datos de la Figura 9 graficados en otra forma (<http://www.aire.cdmx.gob.mx/>)

Abordando el mismo tema, la concentración máxima diaria de ozono para cada año en la Zona Metropolitana del Valle de México y mostrando el valor que se registró el 14 de marzo de 2016 a las 17 horas, elaborada con la base de datos de la RAMA, indica que cuando hay estancamiento por políticas equivocadas en el Programa de Verificación Vehicular Obligatorio ocurren

las contingencias (Figura 11). La señal de alarma se prendió desde 2013, pero las autoridades no hicieron nada para abordar la problemática de los precursores de la formación del ozono troposférico. En las Figuras 12a, b y c se muestran las concentraciones de monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno que clarifican esto (Figura 13).



Figura 11. Zona Metropolitana del Valle de México mostrando el valor que se registró el 14 de marzo de 2016 a las 17 horas (elaborada con la base de datos de la RAMA; <http://www.aire.cdmx.gob.mx/>)



Figura 12a. Concentración máxima diaria de monóxido de carbono (CO) para cada año en la Zona Metropolitana del Valle de México mostrando el valor que se registró el 16 de enero de 2016 elaborada con la Base de datos de la RAMA (arriba)

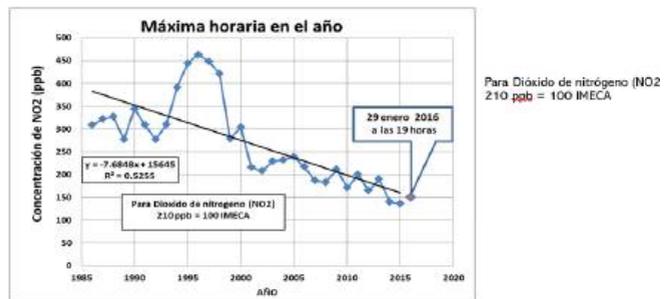


Figura 12b. Concentración máxima diaria de óxidos de nitrógeno (NOx) para cada año en la Zona Metropolitana del Valle de México mostrando el valor que se registró el 22 de febrero de 2016 (ver arriba la fuente)



Para Dióxido de nitrógeno (NO₂)
210 ppb = 100 IMECA

Figura 12c. Concentración máxima diaria de óxidos de nitrógeno (NOx) para cada año en la Zona Metropolitana del Valle de México mostrando el valor que se registró el 22 de febrero de 2016, elaborada con la base de datos de la RAMA (ver arriba la fuente)

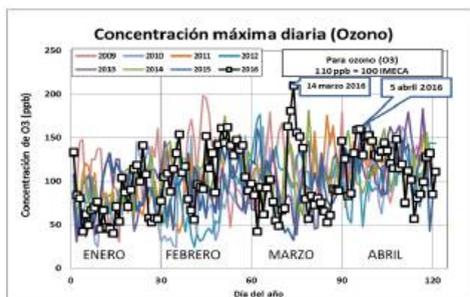


Figura 13. Concentración máxima diaria de ozono (O₃) para los primeros cuatro meses de los años 2009 a 2016 en la ZMVM mostrando el valor que se registró el 14 de marzo de 2016 y el 05 de abril de 2016, por los cuales se decretaron contingencias ambientales (ver arriba la fuente)

Tal vez esta información resulte familiar a los lectores a lo largo de los 8 años que han transcurrido desde que el autor acopió estos datos para presentarlos en 2016. El gobierno federal ha cambiado en este lapso pero los ciudadanos y las autoridades no hemos aprendido a aplicar la química atmosférica para beneficio de la salud de la población y, sobre todo, a educar a la población para que lo comprenda. No hay evidencia de que el **HOY NO CIRCULA AMPLIADO** haya servido para reducir la contaminación por ozono.

Escenarios para reducir las emisiones contaminantes de los vehículos automotores

A) El decretado el 30 de marzo de 2016 contenido en el **Acuerdo por el que se dan a conocer las Medidas Temporales** Se limita la circulación de los vehículos automotores, **sin considerar el holograma que porten (00, 0, 1 y 2)**, así como un sábado

al mes, de acuerdo con el último dígito numérico de las placas de circulación.

B) La precontingencia ambiental por ozono del **PROGRAMA PARA CONTINGENCIAS AMBIENTALES** Dejan de circular vehículos con hologramas de verificación "1" y "2" y permisos, con terminación numérica de placa de circulación non o par de manera alternada.

C) Dejan de circular todos los vehículos con holograma de verificación "2" de las 5:00 a las 22:00 horas de lunes a viernes.

D) Dejan de circular vehículos con holograma de verificación "1" y holograma de verificación "2" de las 5:00 a las 22:00 horas un día adicional a la semana.

A continuación, el autor presenta la reducción de vehículos en circulación: Autos particulares, vehículos suburbanos en una megalópolis, *SUV -suburban vehicles-* en

inglés, de la clase media que se siente alta y de algunos funcionarios públicos y privados (tal vez porque los vehículos son más altos de lo normal) y taxis y de

emisiones de distintos contaminantes de acuerdo con el escenario planteado. Se resaltan en rojo los valores calculados mayores (Tabla 12).

Reflexiones finales

- La medida que ha favorecido la reducción de la contaminación en la ZMVM es la existencia del Holograma "0"
 - Favorece la renovación del parque vehicular con vehículos menos contaminantes
 - Saca de circulación a los vehículos más contaminantes
- Se necesitan normas más estrictas para la circulación de vehículos en la ZMVM aunque no den votos
- Faltan esfuerzos más significativos de mejora del transporte público y no nada más para que den más votos sino porque se requiere un monorriel eléctrico operado con celdas fotovoltaicas arriba del Anillo Periférico completo (aunque no lo esté para los vehículos particulares) que mueva millones de personas diariamente conectado con transportes en tierra del Metro y los metrobuses en zonas estratégicas pensando en la enorme población a servir.

Tabla 12. Escenarios de acuerdo con el número de vehículos que salen de circulación por día por el tipo de contingencia

Contaminantes	Escenario A		Escenario B		Escenario C		Escenario D	
	Números de vehículos que salen de circulación por día							
	484,809		423,995		445,665		231,542	
	Valor de reducción de las emisiones de los contaminantes							
	ton/año	% del total	ton/año	% del total	ton/año	% del total	ton/año	% del total
PM10	125	0.36%	88	0.25%	88	0.25%	48	0.14%
PM2.5	58	0.61%	41	0.43%	40	0.42%	22	0.23%
SO2	31	0.65%	25	0.51%	26	0.53%	14	0.28%
CO	99,031	6.17%	98,188	6.11%	115,940	7.22%	54,293	3.38%
NOx	13,180	5.51%	11,238	4.70%	11,184	4.68%	6,104	2.55%
COV	9,100	1.44%	17,462	2.76%	21,326	3.37%	9,693	1.53%





https://es.wikipedia.org/wiki/La_regi%C3%B3n_m%C3%A1s_transparente#:~:text=En%201917%2C%20Alfonso%20Reyes%20utiliz%C3%B3,conquistadores%20en%20el%20siglo%20XVI.

En 1917, Alfonso Reyes utilizó la frase "Viajero: has llegado a la región más transparente del aire" como epígrafe de su ensayo *Visión de Anáhuac*, describiendo al valle de México y el paisaje físico que encontraron en él los conquistadores en el siglo XVI. La usó más tarde (1951) en su escrito *Palinodia del polvo*: "¿Es ésta la región más transparente del aire? ¿Qué habéis hecho, entonces, de mi valle metafísico? ¿Por qué se empaña, por qué se amarillece?". En 1958, Carlos Fuentes tituló su primera novela como *La región más transparente*, cuyo protagonista principal es la misma. " ...describe fragmentos de la vida de una gran cantidad de personajes, cuyas historias llegan a entrelazarse, pero el protagonista real de la

novela es la propia ciudad. La mayor parte de las historias de los personajes ocurren en la década de 1950, época de la primera generación del México postrevolucionario, no obstante las narraciones del pasado de algunos personajes comienzan en 1900, de esta forma el cuadro cronológico de la novela abarca desde los años finales del porfiriato hasta el alemanismo (Pacheco, 2008). Pero es la ciudad la que realmente abraza o destruye a los personajes, a los aristócratas, a los nuevos ricos, a los toreros, a los filósofos, a los obreros, a las prostitutas, a los periodistas y a todos sus habitantes (Monsiváis, 2009). En la novela se hace recurrente la crítica al sistema político y social de México especialmente al fracaso de la Revolución Mexicana (Pacheco, 2008), contrario al discurso triunfalista oficial del gobierno, así como a las traiciones cometidas por quienes lucharon entre sus filas y medraron a sus expensas (Celorio, 2008). La técnica narrativa rompe con la linealidad del pasado, presente y futuro, las historias de los personajes se mueven y presentan de forma simultánea sin ningún orden (Iglesias, 2008). De acuerdo con el propio Carlos Fuentes, el objetivo de la novela es retratar el punto de intersección del profundo cambio social de la sociedad del México postrevolucionario con el destino individual de los personajes".

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.

Conflicto de interés

El autor de este manuscrito declara no tener ningún tipo de conflicto de interés.

Agradecimientos

El autor reconoce el esfuerzo de los(as) editores(as) de esta revista por más de 10 años para buscar autores que deseen publicar sus conocimientos aunque no les den "puntos" por no estar esta revista indizada en las revistas diamante ni en las revistas del Conacyt sino solamente en el Directorio de Latindex, que es el que los(as) apoya.

Referencias

Barnés, F.J. 2024. Información personal. México.

Base de datos de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico, RAMA, <http://www.aire.cdmx.gob.mx/>

Centro Molina de Energía y Ambiente de la Ciudad de México. 2005. "Evaluación costo beneficio de la mejora en la calidad de los combustibles automotrices en el país"

"Celorio, Gonzalo. 2008. «Carlos Fuentes, epígono y precursor». En Carlos Fuentes, ed. La región más transparente (Real Academia Española, Asociación de Academias de la Lengua Española edición). Alfaguara. pp. XIII-XXVII. ISBN 978-84-204-2250-3. México."

Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C. 2022. Tercera parte de una serie de tres capítulos que la autora escribió sobre su ciudad, la Ciudad de México. Está disponible en la página electrónica de los Laboratorios de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental en el siguiente enlace: <https://ambiental.unam.mx/albunimagenes/2022%20DAAD/2022%20Libro-e-Book%20UNAM-DAAD%20KAS3.pdf> (Pp. 401-412) y Alfonso Reyes (1917) utilizó la frase "Viajero: has llegado a la región más transparente del aire" como epígrafe de su ensayo Visión de Anáhuac, describiendo al valle de México y el paisaje físico que encontraron en él los conquistadores en el siglo XVI [Ver nota abajo de los(as) editores(as)].

Harari, Y.N. 2020. De animales a dioses. Breve historia de la humanidad. Debate. Penguin Random House Grupo Editorial. México.

"Iglesias, Carmen. 2008. «Historia y novela: La región más transparente, de Carlos Fuentes». En Carlos Fuentes, ed. La región más transparente (Real Academia Española-Asociación de Academias de la Lengua Española edición). Alfaguara. Pp. 543-562. ISBN 978-84-204-2250-3. México."

“Monsiváis, Carlos. 2009. «Notas sobre la cultura mexicana del siglo XX». En Daniel Cosío Villegas, ed. Historia general de México. El Colegio de México. Pp. 957-1076. ISBN 968-12-0969-9. México. Consultado el 26 de mayo de 2012.”

“Pacheco, José Emilio. 2008. «Carlos Fuentes en La región más transparente». En Carlos Fuentes, ed. La región más transparente (Real Academia Española-Asociación de Academias de la Lengua Española edición). Alfaguara. Pp. XXIX-XXXVIII. ISBN 978-84-204-2250-3. México.”

Pemex. 2015. Comunicado de prensa, diciembre 8. México. <https://www.gob.mx/epn/prensa/anuncia-el-presidente-enrique-pena-nieto-inversiones-verdes-de-pemex-por-23-mil-millones-de-dolares>

UNA AMENAZA SILENCIOSA: LA RESISTENCIA BACTERIANA A LOS ANTIBIÓTICOS

A SILENT THREAT:
BACTERIAL RESISTANCE TO ANTIBIOTICS

Michelle Romina Alatríste León
Alexa Chacón Ortega
Berenice Gonzáles Tecpa

Ingeniería en Biotecnología, Tecnológico de Monterrey, Campus Puebla.

Correos:
m.alatris05@gmail.com
alexachacoon@gmail.com
berenice.gont@gmail.com

Dirección Postal: Desarrollo Atlixcayotl, 72453 Heroica Puebla de
Zaragoza, Pue.

<https://orcid.org/0009-0004-3206-0347>
<https://orcid.org/0009-0000-9329-560X>
<https://orcid.org/0009-0004-8953-8540>

FOLIO: A11N109.25/1025

Resumen

La resistencia bacteriana a los antibióticos representa una amenaza creciente para la salud pública mundial. Este fenómeno ocurre cuando las bacterias se adaptan y dejan de responder a los tratamientos convencionales, complicando infecciones que antes eran fáciles de tratar. Factores como el mal uso de antibióticos en humanos y animales, así como la escasa innovación farmacéutica, han acelerado esta crisis. Sin embargo, la misma naturaleza que produce superbacterias, también ofrece soluciones, y la ciencia explora cómo aprovechar a las propias bacterias para generar nuevos antibióticos. Este artículo explica las causas, riesgos y posibles caminos de innovación frente a la resistencia a los antimicrobianos.

Palabras clave: Resistencia bacteriana, antibióticos, adaptación, infección, bacterias

Abstract

Antibiotic resistance is a growing threat to global public health. It occurs when bacteria adapt and stop responding to conventional treatments, making previously simple infections hard to treat. Misuse of antibiotics in humans and animals, along with limited pharmaceutical innovation, have exacerbated this crisis. However, the very nature that produces superbacteria, also offers solutions, and science explores how to harness bacteria themselves to generate new antibiotics. This article explains the causes, risks and possible ways to cope with antibiotic resistance.

Keywords: Antibiotic resistance, antibiotics, adaptation, infections, bacteria.

Introducción

La humanidad se encuentra en un punto crucial en la medicina moderna. Tras años de triunfos, la eficacia de los antibióticos disminuye gracias a la resistencia bacteriana, una amenaza silenciosa y global capaz de revertir décadas de progreso sanitario haciendo más retador el control

de enfermedades infecciosas. Ante esta tendencia, es importante entender las causas de la crisis por los antibióticos y ahondar en estrategias innovadoras que permitan hacer frente a las superbacterias.

Una historia real, una bacteria imparable

Imagina que contraes una infección del oído que debería ser tratable con antibióticos comunes. Sin embargo, después de semanas de tratamiento, los médicos te informan que el antibiótico no está funcionando y que debido a esto necesitarás un implante coclear, lo que evidentemente no tenías presupuestado y que cambiará por completo tu vida. ¿La razón? La bacteria responsable de la infección ha desarrollado resistencia, lo que significa que los medicamentos que antes la combatían ahora ya no son eficientes.

El anterior no es un escenario ficticio, sino que es la realidad de muchos pacientes en la actualidad. En 2017, una paciente de Nevada falleció por una infección de la bacteria *Klebsiella pneumoniae*, resistente a todos los antibióticos.

A pesar de los esfuerzos médicos, su cuerpo no pudo combatir la infección, lo que resultó en una tragedia (Washington, 2017). En España, en 2016, una joven de 21 años diagnosticada con tuberculosis multirresistente (TB-MFR), había tenido dos episodios previos de tuberculosis, pero la falta de adherencia a los tratamientos anteriores permitió a las bacterias desarrollar resistencia (Farmacia Hospitalaria, 2016). La paciente fue hospitalizada durante 53 días y sometida a tratamientos agresivos con fármacos menos comunes, lo que complicó su recuperación. Estos casos muestran que la resistencia bacteriana no es un problema aislado, sino una amenaza silenciosa que se extiende por todo el mundo, afectando a personas en distintas circunstancias y regiones.

¿Cómo se produce la resistencia bacteriana?

La resistencia bacteriana ocurre cuando las bacterias desarrollan la capacidad de sobrevivir al efecto de los antibióticos a los que originalmente eran vulnerables. En lugar de morir, las bacterias encuentran la forma de mutar al estar expuestas al antibiótico y hacer frente a este, lo que las convierte en "superbacterias". Esto significa que infecciones comunes, como las del tracto urinario o respiratorias, pueden volverse más difíciles o incluso imposibles de tratar (Silvas, 2023).

La Figura 1 muestra, paso a paso, cómo las bacterias se vuelven resistentes cuando hay Durante los primeros años del descubrimiento de los antibióticos, estos fueron considerados "drogas milagrosas". La penicilina, por ejemplo, salvó millones de vidas al tratar infecciones que antes eran mortales. Sin embargo, las bacterias han encontrado maneras de adaptarse y hacer frente a estos medicamentos (Giono, 2020). antibióticos presentes.

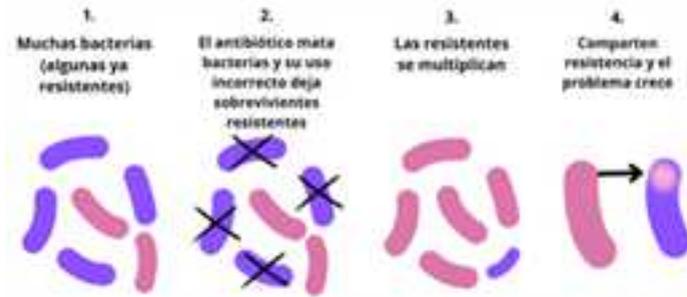


Figura 1. Capacidad de penetración del pezón materno en las estructuras intraorales de los neonatos (Imagen propia)

Durante los primeros años del descubrimiento de los antibióticos, estos fueron considerados “drogas milagrosas”. La penicilina, por ejemplo, salvó millones de vidas al tratar infecciones que antes

eran mortales. Sin embargo, las bacterias han encontrado maneras de adaptarse y hacer frente a estos medicamentos (Giono, 2020).



<https://elmedicointeractivo.com/las-bacterias-resistentes-a-antibioticos-pueden-ser-controladas-si-se-actua-rapido/>

Factores que contribuyen a la resistencia a los antibióticos en la vida cotidiana

Existen varias causas que generan resistencia bacteriana, entre ellas la automedicación, que se presenta cuando el paciente presenta síntomas que se pueden confundir con otra enfermedad o infección, y decide tomar medicamentos no indicados para la enfermedad que manifiesta, sin acudir antes al médico a recibir un diagnóstico. Pero también ocurre cuando el médico indica un tratamiento antibiótico, debido a una enfermedad bacteriana y el paciente decide no

terminar el tratamiento porque se “siente mejor”, u omite las indicaciones de la prescripción médica, permitiendo que las bacterias sobrevivientes y causantes de la enfermedad se adapten a las dosis del antibiótico recetado y, en consecuencia, desarrollen resistencia (Martínez, 2010).

Algunas otras causas de la resistencia bacteriana están relacionadas con errores al medicar, confundiendo síntomas de enfermedades virales con síntomas de

enfermedades bacterianas. Esto lleva a un uso innecesario de antibióticos.

Aunque algunos síntomas causados por bacterias y virus pueden parecer similares, (fiebre, congestión nasal, dolor e inflamación de garganta), estos dos organismos son completamente diferentes.

Las bacterias son células vivas que pueden reproducirse por sí mismas,

mientras que los virus no están vivos en ese mismo sentido; sino que necesitan invadir células humanas para multiplicarse.

Por eso, tomar antibióticos diseñados para atacar estructuras propias de las bacterias no es eficaz para tratar enfermedades virales y, en cambio, contribuye a fortalecer las bacterias que habitan naturalmente en el cuerpo humano. Es importante tener noción de las diferencias entre bacterias y virus, ya que están presentes en nuestro día a día y son la causa de diversas enfermedades. Estas diferencias se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Comparativa Bacteria vs. Virus. Elaboración propia con información de Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades (CDC): <https://www.cdc.gov/antibiotic-use/about/index.html>

Característica	Bacterias	Virus
Enfermedades que provocan	Infecciones urinarias, tuberculosis, neumonía	Resfriado común, influenza, COVID-19
Forma de reproducción/replicación	Se multiplican sin ayuda de otras células	Contagioso
Composición	Células vivas con todos los componentes necesarios para sobrevivir	Organismos no vivos con material genético protegido por una cubierta
Tratamiento	Antibióticos (si aplica)	Antivirales o vacunas

¿Superbacterias en la granja?

Otra causa de la resistencia bacteriana se relaciona con la industria ganadera. Una práctica común, aunque ilegal e incorrecta, es administrar antibióticos al ganado con el fin de aumentar su masa muscular, sin embargo, esto puede afectar el sistema inmune de estos animales, lo que ocasiona la necesidad de utilizar antibióticos para evitar pérdidas económicas. Esto lleva a que el consumidor ingiera dosis subterapéuticas de antibióticos en productos de origen animal, que es una de las causas más comunes de la resistencia bacteriana. Una dosis subterapéutica, es aquella que está por debajo de la dosis prescrita por el médico y ante la cual, la bacteria puede sobrevivir y desarrollar mecanismos de resistencia (Camacho, 2023).

La administración masiva de antibióticos en la ganadería, junto con el escaso control en los tratamientos antibacterianos aplicados a los animales, favorece la aparición de bacterias resistentes. Estas bacterias pueden propagarse a otros animales, a las personas y al medio ambiente a través de alimentos contaminados, excrementos utilizados como fertilizante, aguas residuales e incluso el aire. El proceso de propagación de bacterias resistentes en el ambiente, provenientes de animales tratados con antibióticos durante su crianza, se resume en la Figura 2.



Figura 2. Representación visual del desarrollo de bacterias resistentes a los antibióticos en animales, y su propagación al ambiente a través de alimentos contaminados y heces. (ReAct Latinoamérica, 2020). <https://reactlat.org/articulos/exhorto-cria-intensiva-de-animales-y-resistencia-bacteriana-a-los-antibioticos/>

Impacto actual y a futuro, ¡DATOS CONTUNDENTES!

En México, se registran más de 28 mil casos de tuberculosis al año y el 30% de las personas que son portadoras lo desconoce, por lo que es necesario fortalecer la capacidad de detección de esta enfermedad infecciosa antes de correr el riesgo de caer en malas prácticas que generen resistencia a los antibióticos. En 2019 la resistencia a los antibióticos causó 1.27 millones de decesos a nivel mundial y contribuyó a la muerte de 4.95 millones de personas (OMS, 2023).

Se estima que para el 2050, las muertes por esta causa lleguen a los 10 millones anuales a nivel mundial (UNEP, 2024). La Figura 3 ilustra una predicción comparativa de los decesos anuales estimados para el año 2050, contrastando las infecciones resistentes a antibióticos con otras causas comunes de mortalidad.

De seguir esta tendencia, podríamos entrar en una "era post-antibiótica" donde las intervenciones médicas comunes como las cirugías, los trasplantes de órganos o incluso la quimioterapia serían extremadamente riesgosas, debido a la incapacidad de controlar infecciones. En los hospitales, lo anterior significa estancias más largas, tratamientos más costosos, y un mayor índice de mortalidad. Además, el desarrollo de nuevos antibióticos es lento y costoso. Desde los años 80, solo se han introducido unos pocos antibióticos nuevos, y la mayoría de ellos son variaciones de medicamentos existentes. Este rezago en la innovación farmacológica se debe, en parte, al alto costo y al bajo retorno de inversión de investigar nuevos tratamientos, lo que deja al mundo en una carrera constante contra bacterias cada vez más resistentes. .

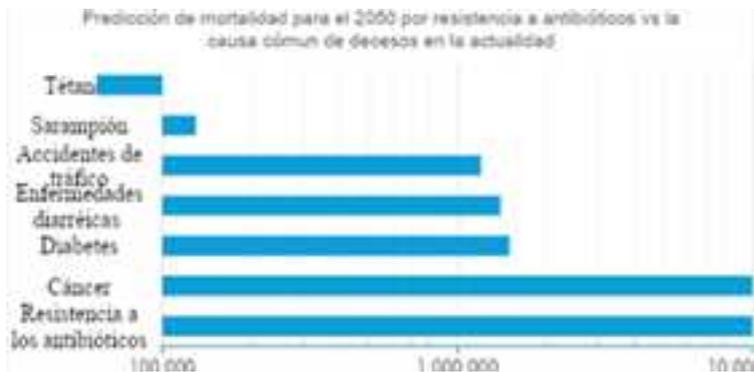


Figura 3. Predicción de mortalidad para el año 2050 por resistencia bacteriana frente a otras enfermedades (Elaboración propia con datos de United Nations Environmental Programme, 2024.) <https://www.unep.org/topics/chemicals-and-pollution-action/pollution-and-health/antimicrobial-resistance-global-threat>)

Pequeñas acciones que salvan grandes tratamientos

Mientras la ciencia desarrolla nuevas estrategias, nuestras prácticas de la vida cotidiana siguen siendo esenciales para evitar la resistencia bacteriana, por lo tanto, es importante vacunarse, ya que previene enfermedades que pudieran requerir antibióticos, reduciendo la exposición general a esos fármacos, y evitar ingerir antibióticos recetados a otras personas, ya que cada persona e infección requieren fármacos y dosis diferentes. También es crucial verificar que los antibióticos estén dentro de su periodo de caducidad y desechar los que hayan expirado en centros de recolección, farmacias, clínicas u hospitales.

Finalmente, mantener buenas prácticas de higiene como lavado de manos frecuente y desinfección de superficies, contribuye a prevenir la propagación de infecciones, disminuyendo la necesidad de recurrir a antibióticos.

Aunque los antibióticos eliminan eficazmente bacterias, como se muestra en la Figura 4, su uso excesivo contribuye al desarrollo de resistencia, por lo que resulta fundamental aplicar medidas preventivas como las mencionadas anteriormente.

Por eso, tomar antibióticos diseñados para atacar estructuras propias de las bacterias no es eficaz para tratar enfermedades virales y, en cambio, contribuye a fortalecer las bacterias que habitan naturalmente en el cuerpo humano. Es importante tener noción de las diferencias entre bacterias y virus, ya que están presentes en nuestro día a día y son la causa de diversas enfermedades. Estas diferencias se resumen en la Tabla 1.



Figura 5. Placas de agar con zona de inhibición (antibiótico), comparando una placa con antibiótico y otra con bacterias crecientes. Se muestra cómo los antibióticos eliminan bacterias. (Microchem Laboratory, n.d.) <https://microchemlab.com/test/zone-inhibition-test-antimicrobial-activity>

Conclusiones

La resistencia bacteriana es una amenaza social, médica y económica que amerita cambios inmediatos en el uso de antibióticos, al tiempo que continúan los avances científicos en el desarrollo de nuevos fármacos. Mediante la innovación científica

y la adopción de buenas prácticas que previenen infecciones, y disminuyen el consumo de antibióticos, será posible contener la expansión de las superbacterias y proteger la eficacia de los antibióticos para el futuro.



shutterstock.com - 1656394471

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.

Conflicto de interés

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

Agradecimientos

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

Referencias

- amacho Silvas, L. A. (2023). Resistencia bacteriana, una crisis actual [Bacterial resistance, a current crisis.]. *Revista Española de Salud Pública*, 97, Artículo e202302013.
- Caycedo, L., Corrales, L., & Trujillo, D. (2021). Las bacterias, su nutrición y crecimiento: una mirada desde la química. *Universidad Colegio Mayor De Cundinamarca*.
- http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-24702021000100049
- Centers for Disease Control and Prevention. (2019). Antibiotic resistance threats in the United States. <https://www.cdc.gov/drugresistance/pdf/threats-report/2019-arthreats-report-508.pdf>
- Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades. (2024). Healthy Habits: Antibiotic Do's and Don'ts. <https://www.cdc.gov/antibiotic-use/about/index.html>
- Gabutti, G. (2022). Available evidence and potential for vaccines for reduction in antibiotic prescriptions. *Human Vaccines & Immunotherapeutics*, 18(7), Artículo 2151291. <https://doi.org/10.1080/21645515.2022.2151291>
- Gallego Muñoz, C., Guerrero Navarro, N., & Parra Alonso, E. (2016). Paciente joven con tuberculosis multifármaco-resistente complicada. *Farmacia Hospitalaria*, 40(5), 453–454. <https://scielo.isciii.es/pdf/fh/v40n5/13carta04.pdf>
- Giono, S., Santos, J., Del Rayo Morfín, M., Torres, F., & Alcántar, M. (2020). Resistencia antimicrobiana. Importancia y esfuerzos por contenerla. *Gaceta Médica de México*, 156(2). <https://doi.org/10.24875/gmm.20005624>
- Martínez-Martínez, L., & Calvo, J. (2010). Desarrollo de las resistencias a los antibióticos: causas, consecuencias y su importancia para la salud pública. *Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica*, 28(Supl. 4), 4-9. [https://doi.org/10.1016/s0213-005x\(10\)70035-5](https://doi.org/10.1016/s0213-005x(10)70035-5)

- Microchem Laboratory. (s.f.). Zone Inhibition Test for Antimicrobial Activity. <https://microchemlab.com/test/zone-inhibition-test-antimicrobial-activity/>
- Mullis, M. M., Rambo, I. M., Baker, B. J., & Reese, B. K. (2019). Diversity, ecology, and prevalence of antimicrobials in nature. *Frontiers in Microbiology*, 10, 2518. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02518>
- National Foundation for Infectious Diseases. (2018). Resistencia a los antibióticos: un problema apremiante de salud pública. <https://es.nfid.org/antibiotic-resistance-a-pressing-public-health-issue/>
- Organización Mundial de la Salud. (2023). Antimicrobial resistance. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/antimicrobial-resistance>
- ReAct Latinoamérica. (2020). Cría intensiva de animales y resistencia bacteriana a los antibióticos. <https://reactlat.org/articulos/exhorto-cria-intensiva-de-animales-y-resistencia-bacteriana-a-los-antibioticos/>
- Satyavrath, A., Serrano, S., & Kalanxi, E. (2022). Poverty and antimicrobial resistance. One Health Trust. <https://onehealthtrust.org/news-media/blog/poverty-and-antimicrobial-resistance/>
- Sociedad Española de Medicina de Laboratorio. (2019). Resistencia bacteriana a los antibióticos. <https://www.labtestsonline.es/articulos/articulos-resistencia-bacteriana-los-antibioticos>
- U.S. Food & Drug Administration. (2020). Eliminación de medicamentos no utilizados: todo lo que debe saber. <https://www.fda.gov/drugs/safe-disposal-medicines/eliminacion-de-medicamentos-no-utilizados-todo-lo-que-debe-saber>
- United Nations Environmental Programme. (2024). Antimicrobial resistance: Global threat. <https://www.unep.org/topics/chemicals-and-pollution-action/pollution-and-health/antimicrobial-resistance-global-threat>
- Washington, A. (2017). Muere una mujer en EEUU por una bacteria resistente a los antibióticos. EL MUNDO. <https://www.elmundo.es/salud/2017/01/14/587a0f80e2704e176a8b457d.html>

OLIMPIADA DE QUÍMICA EN PUEBLA, 35 AÑOS DE AVENTURAS Y RETOS

CHEMISTRY OLYMPIAD IN PUEBLA, 35 YEARS OF ADVENTURES AND CHALLENGES

Luis Aguilar-Carrasco (1)*,
María Eugenia Castro (2)*,
Francisco J. Melendez (1),
Ángel Palillero-Cisneros (1),
Nallely Téllez-Méndez (3),
T. Alexandra Ferreira (4)

(1)Facultad de Ciencias Químicas, BUAP, 72570, Puebla, México.

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

(3)Facultad de Ciencias de la Electrónica, BUAP, 72570, Puebla, México

(4)Universidad del Valle de México, Campus Puebla, 72810, San Andrés Cholula,
Puebla, México

*Delegado y Codelegada de la Olimpiada Nacional de Química en Puebla
(222) 2295500 ext. 7739 y 5927

Autor de correspondencia: luis.aguilar@correo.buap.mx*
mareug.castro@correo.buap.mx*

francisco.melendez@correo.buap.mx
angel.palillero@correo.buap.mx
nallely.tellez@correo.buap.mx
thania.ferreira@uvmnet.edu

<https://orcid.org/0000-0002-0473-6950>
<https://orcid.org/0000-0003-1716-7707>
<https://orcid.org/0000-0002-5796-0649>
<https://orcid.org/0000-0002-1008-1532>
<https://orcid.org/0000-0002-3605-5412>
<https://orcid.org/0000-0001-8159-8611>

Resumen

La Olimpiada de Química en el Estado de Puebla ha buscado consolidarse a lo largo de 35 años como un evento que contribuye a las vocaciones científicas tempranas, convirtiéndose en un semillero de jóvenes talentos que en el corto o mediano plazo logran destacarse en su formación profesional en el área de las Ciencias, especialmente en áreas relacionadas con la Química. El objetivo de las Olimpiadas del conocimiento no solo es la obtención de medallas o reconocimientos, es desarrollar en los jóvenes la participación y competencia sana, sabiendo que la oportunidad es igual para todos, tanto para estudiantes de la capital del Estado como de municipios al interior de este, siendo capaces de llegar a los eventos nacionales y participar destacadamente. Es satisfactorio darse cuenta de que en alguna proporción la Olimpiada de Química toca la vida de jóvenes estudiantes de preparatoria y secundaria que encuentran en la Química la razón de continuar con su formación profesional. El Comité Organizador de la Delegación de Puebla de la Olimpiada Nacional de Química busca crear espacios de convivencia académica y científica para los alumnos, asesores y delegados que participan en las Olimpiadas de Química Estatales y Nacionales representando al Estado de Puebla. Estas actividades incluyen eventos, como el concurso de cuento científico infantil, la feria de experimentos científicos, talleres y diplomados de actualización para los asesores, conversatorios y ciclos de conferencias de destacados investigadores y divulgadores de la Ciencia, así como las propias Olimpiadas Estatales y Nacionales de Química.

Palabras clave: Olimpiada Estatal de Química, Olimpiada Nacional de Química, Delegación Estatal de Puebla, Nivel medio superior, Actividades de Divulgación y Difusión de la Ciencia.

Abstract

The Chemistry Olympiad in the State of Puebla has sought to establish itself over the course of 35 years as an event that contributes to early scientific vocations, becoming a breeding ground for young talents who, in the short to medium term, achieve professional development in the field of science, especially in areas related to Chemistry. The goal of the knowledge Olympiads is not only to obtain medals or recognition, but to develop participation and healthy competition among young people, knowing that the opportunity is equal for all, both students from the state capital and from municipalities within the state, enabling them to reach national events and participate prominently. It is gratifying to realize that, to some extent, the Chemistry Olympiad touches the lives of young high school and middle school students who find in Chemistry the reason to continue their professional training. The Organizing Committee of the Puebla Delegation of the National Chemistry Olympiad seeks to create spaces for academic and scientific interaction for students, advisors, and delegates participating in the State and National Chemistry Olympiads representing the state of Puebla. These activities include events such as the children's science story contest, the science experiments fair, workshops and refresher courses for advisors, discussions and lecture series by prominent researchers and science educators, as well as the State and National Chemistry Olympiads themselves.

Keywords: State Chemistry Olympiad, National Chemistry Olympiad, Puebla State Delegation, High School Level, Science Dissemination and Diffusion Activities.

La Olimpiada de Química en Puebla

Las Olimpiadas de Química son un concurso a nivel estatal que consiste en la aplicación de exámenes escritos, donde se realizan preguntas o problemas sobre conceptos químicos de diferentes áreas de la Química, como química orgánica, química inorgánica, química analítica y fisicoquímica, correspondientes a temarios publicados en la convocatoria. Los participantes son estudiantes de nivel medio superior, preparatorias y bachilleratos, y actualmente también se incluyen estudiantes de nivel secundaria, de los diferentes subsistemas del Estado. El objetivo de las Olimpiadas Estatales de Química es conformar la selección que representa a los Estados del país en las Olimpiadas Nacionales de Química. Las delegaciones Estatales de Química tienen un delegado, que representa a un Comité Organizador Estatal, que se encarga de la logística de cada Olimpiada Estatal que se lleva a cabo cada año. El delegado funge como representante de la Delegación ante el Comité Nacional de la Olimpiada de Química, la cual está conformada por diferentes docentes e investigadores de diferentes Instituciones de Educación Superior del país. Las Olimpiadas Nacionales de Química son organizadas por la Academia Mexicana de Ciencias, para promover el estudio de las Ciencias Químicas entre los jóvenes. Los estudiantes que son seleccionados en las Olimpiadas Nacionales de Química, posteriormente se preparan para participar en la delegación que representa a México en las Olimpiadas Iberoamericanas e Internacionales de Química.

En la etapa de las Olimpiadas Estatales existen 3 categorías: la categoría A para estudiantes que estén cursando el segundo año de nivel medio superior y que hayan participado en convocatorias anteriores; la categoría B para estudiantes que estén cursando primer o segundo año de nivel medio superior y que no hayan participado en convocatorias anteriores; y la categoría C para estudiantes que estén cursando nivel secundaria. En cada Olimpiada Estatal de Puebla se realiza una preselección de entre 15 y 30 estudiantes, los cuales se preparan en sus propias preparatorias y con el Comité

Organizador Estatal para competir en un examen selectivo que finalmente elige a la delegación que representa al Estado de Puebla en las Olimpiadas Nacionales. La delegación Estatal de cada Estado se ha conformado por 4 a 6 estudiantes entre las categorías A y B. En las Olimpiadas Nacionales la competencia consta de varios exámenes teóricos y un examen experimental. Por lo que la preparación desde que se nombra a los participantes de la Delegación Estatal hasta que se lleva a cabo el evento Nacional, es ardua y se realiza mediante asesorías teóricas y prácticas por parte del Comité Organizador Estatal, ex-olímpicos y estudiantes de Posgrado.

La Olimpiada de Química Estatal en Puebla ha cumplido 35 años en 2025. Durante estos 35 años la Delegación ha estado a cargo de 4 diferentes delegados y las sedes de la Delegación de Puebla han sido tres Universidades reconocidas en el Estado y a nivel nacional (Tabla 1).

Tabla 1. Delegados e Instituciones sede de la Olimpiada Nacional de Química en Puebla.

Delegados	Institución sede	Año
Dr. Juan Carlos Ramírez García	Facultad de Ciencias Químicas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, BUAP	Febrero 1990- Junio 2009
Dr. Miguel Ángel Méndez Rojas	Universidad de las Américas Puebla, UDLAP	Julio 2009- Abril 2013
Dr. Alfredo César Benítez Rojas	Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, UPAEP	Mayo 2013- Enero 2015
Dr. Luis Ángel Aguilar Carrasco y Dra. María Eugenia Castro Sánchez	Facultad de Ciencias Químicas e Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, BUAP	Febrero 2015- Julio 2024 y Agosto 2024- a la fecha

Comité Organizador actual de la Delegación de Puebla de la Olimpiada Nacional de Química

Actualmente, el Comité Organizador de la Delegación de Puebla de la Olimpiada Nacional de Química, está conformado por el Dr. Luis Ángel Aguilar Carrasco de la Facultad de Ciencias Químicas de la BUAP como delegado; la Dra. María Eugenia Castro Sánchez del Instituto de Ciencias de la BUAP como codelegada; el Dr. Francisco Javier Meléndez Bustamante y

el Dr. Ángel Palillero Cisneros, ambos de la Facultad de Ciencias Químicas de la BUAP, la Dra. Nallely Téllez Méndez de la Facultad de Ciencias de la Electrónica de la BUAP y la Dra. Thania Alexandra Ferreira García de la Universidad del Valle de México-Campus Puebla, como miembros del Comité Organizador (Figura 1).



Figura 1. Miembros del Comité Organizador de la Delegación de Puebla de la Olimpiada Nacional de Química.

Contamos con el respaldo Institucional y administrativo a través de la Facultad de Ciencias Químicas de 2015 hasta 2024 y actualmente del Instituto de Ciencias de la BUAP a partir de agosto 2024. Hemos organizado 10 Olimpiadas Estatales de Química, desde la edición XXV en 2015 a la edición XXXV en 2025, en diferentes

Preparatorias o Colegios de diversos subsistemas del Estado, como Preparatorias de la BUAP, Colegios de Bachilleres del Estado de Puebla (COBAEP), Colegios de Estudios Científicos y Tecnológicos (CECyTE) y Preparatorias particulares (Tabla 2).

Tabla 2. Preparatorias sede de las ediciones XXVI a XXXV de la Olimpiada Estatal de Química en Puebla en la gestión actual del Comité Organizador de la Olimpiada de Química (2015-2025).

Edición de la Olimpiada Estatal de Química, año	Institución sede	Número de participantes
XXV, 2015	Facultad de Ciencias Químicas, BUAP	85
XXVI, 2016	Preparatoria Benito Juárez García, BUAP	115
XXVII, 2017	Colegio Central A.C. de Puebla	175
XXVIII, 2018	COBAEP Plantel 3, San Jerónimo Caleras	
XXIX, 2019	Instituto Francisco Esqueda	192
XXX, 2020	Preparatoria Emiliano Zapata, BUAP (modalidad en línea)	240
XXXI, 2021	Bachillerato de la Universidad del Valle de Puebla (UVP) (modalidad en línea)	233
XXXII, 2022	CECyTE Plantel Cholula	262
XXXIII, 2023	Bachillerato de la Universidad del Valle de Puebla (UVP)	295
XXXIV, 2024	Colegio Euro Liceo	250
XXXV, 2025	Preparatoria Emiliano Zapata, BUAP	148

En las ediciones XXV a XXXV se han ido incorporando con su participación cada vez más instituciones, públicas y privadas, participando aproximadamente 55 preparatorias de todo el Estado de Puebla (Tabla 3).

Tabla 3. Lista de preparatorias de los diferentes subsistemas del Estado que han participado en las Olimpiadas Estatales de Química en Puebla.

Institución participante
Preparatorias BUAP
Bachillerato Internacional 5 de Mayo
Complejo Regional Centro, San Salvador el Seco
Complejo Regional Mixteca, Chiautla de Tapia
Complejo Regional Mixteca, Izúcar de Matamoros
Preparatoria 2 de Octubre
Preparatoria Alfonso Calderón
Preparatoria Benito Juárez García-BUAP
Preparatoria Emiliano Zapata
Preparatoria Emiliano Zapata, extensión San Martín Texmelucan
Preparatoria Lázaro Cárdenas
Preparatoria Urbana Enrique Cabrera Barroso
Preparatoria Regional Enrique Cabrera Barroso, Tecamachalco
Centros Escolares
Centro Escolar Gustavo Díaz Ordaz
Centro Escolar Manuel Espinosa Yglesias
Centro Escolar José María Morelos y Pavón
Centro Escolar Niños Héroe de Chapultepec, CENHCH
Colegios de Estudios Científicos y Tecnológicos
CECyTE Plantel Chignahuapan
CECyTE Plantel Cholula
CECyTE Plantel Cuatempan
CECyTE Plantel Guadalupe Victoria
CECyTE Plantel Tlacotepec de Benito Juárez
CECyTE Plantel Tecamachalco
CECyTE Plantel Xicotepec de Juárez
Colegios de Bachiller del Estado de Puebla
COBAEP Plantel 1, San Francisco Totimehuacán
COBAEP Plantel 3, San Jerónimo Caleras
COBAEP Plantel 5, San Martín Texmelucan
COBAEP Plantel 7, Chiautla de Tapia
COBAEP Plantel 8, Tehuacán
COBAEP Plantel 11, Xicotepec de Juárez
COBAEP Plantel 13, San Miguel Xoxtla
COBAEP Plantel 18, Santana Xalmimilulco

COBAEP Plantel 23, Zacatlán
 COBAEP Plantel 27, Zaragoza
 COBAEP Plantel 30, Tlacotepec de Benito Juárez

Preparatorias particulares

Bachillerato de la Universidad del Valle de Puebla (UVP)
 Colegio Benavente
 Colegio Central A.C. de Puebla
 Colegio Euro Liceo
 Colegio Humboldt
 Colegio Progreso, San Martín Texmelucan
 Instituto Francisco Esqueda
 Instituto García Cisneros
 Instituto Iberia
 Instituto La Paz de Puebla A.C.
 Liceo Británico de México
 Preparatoria del Instituto Tecnológico de Monterrey
 Preparatoria de la UPAP

Centros de Bachillerato Tecnológico Industrial y de Servicios

CBTIS Plantel 229, Tehuacán

Centro de Educación Media Superior a Distancia

EMSaD Plantel Ameluca
 EMSaD Plantel Buena Vista
 EMSaD Plantel Octavio Paz

Escuelas Técnicas

Escuela Técnica Número 1, Puebla
 Escuela Técnica Número 2, Francisco I. Madero
 Escuela Técnica Número 45, Santa María Coronango

Nuestra identidad

El escudo de la Delegación del Estado de Puebla no existió sino hasta el periodo en que el Dr. Miguel Ángel Méndez Rojas fungió como delegado y se mantuvo hasta el 2015 (Figura 2A), cuando se tomó la decisión de actualizarlo y convertirlo en el que a la fecha es el escudo de nuestra Delegación (Figura 2B). Nuestro escudo es una insinuación de anillo bencénico con los anillos olímpicos, ya emblemáticos y reconocidos por todos como símbolo del Olimpismo, y también se acuñó el lema: "Por la Ciencia, a la Transformación del Conocimiento".



Figura 2. Escudo de la Delegación de Puebla de la Olimpiada Nacional de Química. a) Escudo anterior. b) Escudo actual.

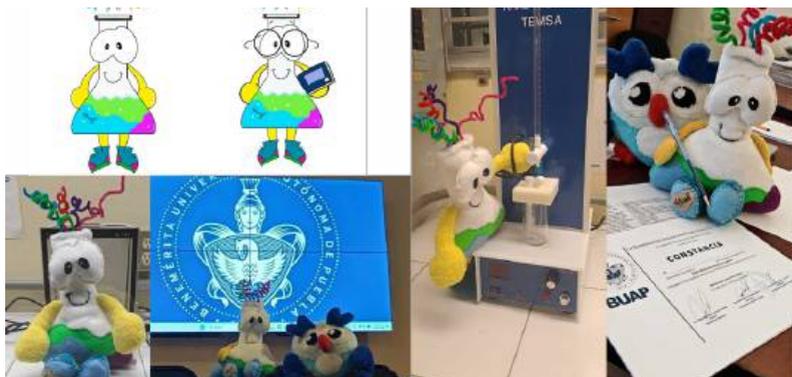


Figura 3. Dr. Matrazovich, mascota de la Delegación de Puebla de la Olimpiada Nacional de Química.

Con el objetivo de acercarnos más a nuestros participantes y a la comunidad en general surgió la idea de crear una mascota que llamara la atención de los niños y los jóvenes, además de que estuviera asociada a la Química. Nuestra mascota nació en febrero de 2021 y es un matraz sonriente, en cuyo interior parece que se está llevando a cabo una reacción química y de cuya parte superior salta parte de esa reacción, se llama Doctor Matrazovich (Figura 3). A partir de ese momento surgió el concurso de cuento científico infantil “El Club del Doctor Matrazovich”, que se ha llevado a cabo ya en cuatro ediciones, además nos acompaña en todos los eventos que organiza la Delegación de Puebla de la Olimpiada Nacional de Química.

La Delegación de Puebla de la Olimpiada Nacional de Química se enorgullece de ser inclusiva. En 2017, Jesús Joaquín Cerón Melgoza, un alumno de la Preparatoria Enrique Cabrera Barroso de la BUAP,

diagnosticado como asperger de altas capacidades, nos pidió formar parte de la Delegación Estatal para representar a Puebla en la XXVI Olimpiada Nacional de Química que se llevó a cabo en San Luis Potosí en 2017. Aunque no podría participar por las medallas por su incorporación posterior al selectivo, Joaquín obtuvo una gran puntuación y adquirió experiencia para volver a competir en todo el proceso selectivo y formar parte de la Delegación Estatal en la XXVII Olimpiada Nacional de Química en Puebla en 2018, con un gran desempeño y obteniendo medalla de bronce nacional. Esta experiencia fue muy enriquecedora para nuestra Delegación y nos hizo reflexionar en torno a cómo nos acercamos y tratamos a las personas neurodiversas, así que con orgullo podemos decir que “nos pintamos de azul ♥” y que intentamos apoyar en los distintos eventos para concientizar a más personas sobre el autismo y asperger (Figura 4).



Jesús Joaquín Cerón Melgoza

Tiene 17 años.

Curso el Segundo Año en la Preparatoria Enrique Cabrera Barroso, Uztiza de la licenciatura en la Universidad Autónoma de Puebla.

Se encuentra dentro de la Categoría del Espectro Autista (Especificamente Síndrome de Asperger).

Ha pasado barreras sociales, comunicativas, sensoriales.

Desde pequeño fue diagnosticado con un Coeficiente Intelectual muy elevado.

Fue reconocido por sus destrezas por jugar con Aplicaciones Educativas.

Participó en Secundaria en la Olimpiada del Conocimiento de Ciencias con un extraordinario Segundo Lugar.

Participó en la Olimpiada Mexicana de Matemáticas y obtuvo tercer lugar a nivel Estatal.



Participó en Olimpiada Estatal de Física. Y en XXVII Olimpiada Nacional de Química obtuvo tercer lugar (Medalla de Bronce).

Fue invitado por la SEP para participar en Programa SPINA.

Involucrado con Presidente de la República a la firma del Documento de la Ley General para la Atención y Protección a Personas con la Condición del Espectro Autista.

Figura 4. En la Delegación de Puebla de la Olimpiada Nacional de Química “nos pintamos de azul ♥”.

10 años con medallas

Este Comité Organizador ha preparado a los estudiantes que han conformado las selecciones que han representado a nuestro Estado de Puebla en 9 Olimpiadas Nacionales de Química, desde la edición XXV en 2016 hasta la edición XXXIV en 2025. Estas Olimpiadas Nacionales de Química se han llevado a cabo en las

ciudades de Guanajuato (2016 y 2019), en San Luis Potosí (2017), en Puebla (2018 y 2022), en Hermosillo, Sonora (2019), Morelos (2024) y Querétaro (2025), así como dos Olimpiadas virtuales en 2020 y 2021 durante la pandemia (Figura 5). Hemos obtenido 13 medallas de bronce, 4 de plata y 2 de oro (Tabla 4).



Figura 5. Miembros del Comité Organizador de la Delegación de Puebla de la Olimpiada Nacional de Química en la XXV, XXVI, XXVIII, XXIX, XXXIII y XXXIV Olimpiadas Nacionales de Química (ver Tabla 4).

Tabla 3. Lista de preparatorias de los diferentes subsistemas del Estado que han participado en las Olimpiadas Estatales de Química en Puebla.

Edición de la Olimpiada Nacional de Química, año, lugar	Estudiante/Institución	Medalla
XXV, 2016, Guanajuato	Carlo Magno Porras, Preparatoria Emiliano Zapata-BUAP	
	Roberto Manríquez, Preparatoria Benito Juárez-BUAP	
XXVI, 2017, San Luis Potosí	Carlo Magno Porras, Preparatoria Emiliano Zapata-BUAP	
	Luis Fernando Porras, COBAEP P5, San Martín Texmelucan	
XXVII, 2018, Puebla	Luis Fernando Porras, COBAEP P5, San Martín Texmelucan	
	Jesús Pérez Aguilar, COBAEP P23, Zacatlán	
	Jesús Joaquín Cerón Melgoza, Preparatoria Urbana Enrique Cabrera Barroso-BUAP	

XXVIII, 2019, Guana-juato	Jorge González Lamas, Preparatoria del Colegio Humboldt	
	Álvaro Perea Hernández, COBAEP P27, Zaragoza	
	Jesús Pérez Aguilar, COBAEP P23, Zacatlán	
XXIX, 2019, Hermosillo	Miguel Ángel Cruz Hernández, Preparatoria Benito Juárez García-BUAP	
XXX, 2020, modalidad en línea	Diego Ortega Ramiro, Preparatoria Benito Juárez García-BUAP	
	Yoshimarth Maldonado Flores, Preparatoria Benito Juárez García-BUAP	
XXXI, 2021, modalidad en línea	Maritza Alejandra Sánchez, CECyTE Plantel Cholula	
	Yoshimarth Maldonado Flores Preparatoria Benito Juárez García-BUAP	
XXXII, 2022, Puebla	María del Pilar de la Rosa Vázquez, Preparatoria Benito Juárez García-BUAP	
	Amy Vianey Taboada Márquez, Colegio Progreso, San Martín Texmelucan	
XXXIII, 2024, Morelos	Erik Sergio Díaz Sosa, COBAEP P5, San Martín Texmelucan	
XXXIV, 2025, Que-rétaro	Luis Gerardo Nájera Flores, COBAEP P5, San Martín Texmelucan	
XXXV, 2026, sede por definirse	Por realizarse en febrero de 2026	
TOTAL		19 medallas

Tras 27 años de historia de las Olimpiadas Nacionales de Química, Puebla nunca había sido sede del evento, a pesar de que varios alumnos habían sido acreedores de medallas nacionales, preclasificados y clasificados a los eventos internacionales. Fue hasta 2018, por iniciativa del Comité Organizador actual, que Puebla solicitó la sede y la obtuvo. Tuvimos el reto de organizar la XXVII Olimpiada Nacional de Química en las instalaciones de la Facultad de Ciencias Químicas de la BUAP en febrero de 2018 (Figura 6). Fue un trabajo arduo y agotador, con muchos contratiempos que resolver, pero que finalmente fue un éxito que también se reflejó en lo académico obteniendo una medalla de oro y dos de

bronce (ver Tabla 4). En 2022, después de la pandemia, la obtención de recursos para organizar nuevamente una Olimpiada Nacional de Química era muy complicada, había muchas incógnitas, dudas y conflictos. A pesar de ello, solicitamos nuevamente la sede para organizar la XXX Olimpiada Nacional de Química en Puebla en noviembre de 2022. Con todo lo que implicó regresar a la presencialidad, con la ayuda de la BUAP y el CONCyTEP, fue posible llevarla a cabo nuevamente en las instalaciones de la Facultad de Ciencias Químicas. Ahora con más experiencia y menos contratiempos, fuimos también orgullosos acreedores de dos medallas de bronce nacionales en casa (Figura 6).



Figura 6. Delegación de Puebla en las XXVII y XXXII Olimpiadas Nacionales de Química organizadas en la Facultad de Ciencias Químicas de la BUAP, en Puebla en 2018 y 2022.

Actividades que promueve la Delegación de Puebla de la Olimpiada Nacional de Química

Hemos organizado eventos de divulgación y difusión de la Química para impactar en los estudiantes de nivel básico (primaria y secundaria) y nivel medio superior (preparatoria y bachillerato), como el Concurso de Cuento Infantil: el Club del Dr. Matrazovich, ya en su cuarta edición. También se han llevado a cabo diversos talleres y diplomados de actualización en temas selectos de química para los asesores de los estudiantes inscritos en las Olimpiadas de Química, conversatorios

y ciclos de conferencias de destacados investigadores y divulgadores de la Ciencia como la Dra. Julieta Fierro, el Dr. Daniel Mocenchua, el Dr. Felipe León Olivares, la Mtra. Rosa María Catalá, el Dr. Vicente Talanquer, el Dr. Abel Moreno, la Dra. Lydya Galagovsky Kurman y el Dr. Plinio Sosa (Figura 7). Además, hemos integrado en las asesorías y organización de las Olimpiadas Estatales y Nacionales de Química a exolímpicos y estudiantes de Posgrado, como parte de su retribución social.



Figura 7. Actividades organizadas por el Comité Organizador de la Delegación de Puebla de la Olimpiada Nacional de Química: Ciclos de conferencias, conversatorios, concurso de cuento científico infantil, diplomados de actualización y talleres para los asesores.

Festejando 35 años de Olimpiada Estatal de Química en Puebla

Recientemente, el 5 de julio de 2025 se llevó a cabo la XXXV Olimpiada Estatal de Química en Puebla, con sede en la Preparatoria Emiliano Zapata de la BUAP. En esta última edición participaron alrededor de 30 preparatorias de diferentes subsistemas del Estado con un total de 148 participantes. Fue una gran fiesta que preparamos con tiempo, ya con la experiencia que nos ha dado organizar diez ediciones entre presenciales y en línea. Con

el acompañamiento de las autoridades del ICUAP y de la Dirección de Comunicación Institucional de la BUAP, le dimos una gran difusión a la XXXV Olimpiada Estatal de Química en programas de radio y TV BUAP, tuvimos la oportunidad de organizar talleres para los asesores y contamos con el apoyo de los exolímpicos y estudiantes de licenciatura y posgrado de nuestros grupos de investigación para la logística de este significativo evento (Figura 8).



Figura 8. Actividades de la XXXV Olimpiada Estatal de Química en Puebla, organizadas por el Comité de la Delegación de Puebla de la Olimpiada Nacional de Química.

¿Hacia dónde vamos?

Queremos seguir sumando éxitos a esta Delegación de Puebla de la Olimpiada Nacional de Química. Compartir la idea de que las medallas tienen el nombre y apellidos de quienes las han ganado, pero el éxito corresponde a una gran labor de equipo.

Este año tenemos 29 preseleccionados de 11 preparatorias diferentes (Tabla 5). La selección que nos representará en la XXXV Olimpiada Nacional de Química en 2026 se elegirá en un examen selectivo a celebrarse en diciembre de este año en la Preparatoria de la Universidad del Valle de México-Campus Puebla.

Tabla 5. Alumnos preseleccionados en la XXXV Olimpiada Estatal de Química para formar parte de la Delegación Puebla que nos representará en la XXXV Olimpiada Nacional de Química 2026.

Categoría	Nombre del estudiante	Institución	Lugar obtenido
A	Ivonne Teodor Macías	Preparatoria Regional Enrique Cabrera Barroso, Tecamachalco	Primero
A	Emely Sarabia Gonzaga	Preparatoria Regional Enrique Cabrera Barroso, Tecamachalco	Segundo
A	Eduardo Morales Velázquez	Preparatoria Emiliano Zapata	Tercero

A	Silvana Luna del Carmen	Preparatoria Benito Juárez García	Mención honorífica
A	Oswaldo Sánchez Cabrera	Preparatoria Regional Enrique Cabrera Barroso, Tecamachalco	Mención honorífica
A	Jadhriel Ramírez Barroso	COBAEP Plantel 5, San Martín Texmelucan	Mención honorífica
A	Israel Angulo Jiménez	Preparatoria Emiliano Zapata	Mención honorífica
A	Fernanda Cruz Castelán	Preparatoria Benito Juárez García	Mención honorífica
A	Martín González Cruz	COBAEP Plantel 23, Zacatlán	Mención honorífica
A	Carlos Ponce Herrera	Preparatoria Benito Juárez García	Mención honorífica
B	Santiago Aguilar Roque	Preparatoria Benito Juárez García	Primero
B	Violeta Gutiérrez Romero	Preparatoria Emiliano Zapata	Segundo
B	Jonathan Cabrera Pérez	Preparatoria Emiliano Zapata, Extensión San Martín Texmelucan	Tercero
B	Alex Jiménez Solís	Preparatoria Benito Juárez García	Mención honorífica
B	Fany Cardona Camarillo	Preparatoria Emiliano Zapata	Mención honorífica
B	Santiago de Jesús Pastrana Moreno	Preparatoria Regional Enrique Cabrera Barroso, Tecamachalco	Mención honorífica
B	Zaid Calvario Hernández	Centro Escolar Manuel Espinosa Yglesias	Mención honorífica
B	Nubia Camarillo García	Preparatoria Regional Enrique Cabrera Barroso, Tecamachalco	Mención honorífica
B	Miguel Ángel Méndez Escalante	COBAEP Plantel 5, San Martín Texmelucan	Mención honorífica
B	Jonathan Ramírez Santos	CECyTE Plantel Xicotepec de Juárez	Mención honorífica
B	Damián Beristain Ramírez	COBAEP Plantel 5, San Martín Texmelucan	Mención honorífica
B	Francisco Calderón Amigón	Complejo Regional Mixteca, Chiautla de Tapia	Mención honorífica
B	Miguel de Jesús Flores Martínez	Preparatoria Benito Juárez García	Mención honorífica
B	Valeria Pastrana Ramírez	Preparatoria Regional Enrique Cabrera Barroso, Tecamachalco	Mención honorífica
B	Sebastián Ramírez Ángeles	Preparatoria Benito Juárez García	Mención honorífica
B	Gerardo Serrano Flores	Preparatoria Emiliano Zapata	Mención honorífica
C	Sofía Mora Parras	Centro Escolar Gustavo Díaz Ordaz	Primero
C	Vladimir Lozada Quijada	Centro Escolar Manuel Espinosa Yglesias	Segundo
C	Rafael Labastida de la Rosa	Escuela Secundaria No. 45, Santa María Coronango	Tercero

Recientemente, editamos el libro "Sembrando Elementos. 35 años de la Olimpiada de Química en Puebla", que concentra las experiencias y anécdotas de quienes a lo largo de este tiempo han sido parte de la Olimpiada de Química en Puebla, como delegados, exolímpicos o asesores, y cuya publicación está pactada para finales de este año. Además, serán

publicados en una edición especial de la revista electrónica Neotraba, los cuentos que participaron en el Cuarto Concurso de cuento científico del Club del Doctor Matrazovich 2025, por publicar en noviembre de este año. Por todos estos logros estamos orgullosos y felices de formar parte de este proyecto.

¡Conócenos y participa!

Si eres exolímpico que estés estudiando una carrera afín a la química, estudiante de maestría o doctorado, investigador que esté realizando una estancia posdoctoral o profesor-investigador interesado en dar una asesoría o curso de química orgánica, química inorgánica, química analítica, fisicoquímica o química cuántica, no dudes en formar parte de la preparación de nuestra delegación Estatal que representará a

Puebla en las Olimpiadas Nacionales de Química. También puedes participar en la logística de las Olimpiadas Estatales de Química, preparación de cursos y talleres para los asesores de los estudiantes participantes o en eventos de divulgación. Participa con nosotros y obtén un reconocimiento por tu participación.

Nuestros datos de contacto son los siguientes:



Dr. Luis Ángel Aguilar Carrasco
Delegado
Doctor en Investigación e Innovación Educativa
Facultad de Ciencias Químicas, BUAP
SNII C
Área de Química Analítica y Educación en Química



luis.aguilan@correo.buap.mx
olimpiada.quimicapuebla@gmail.com



2222295500 ext 5927



Dr. Francisco Javier Meléndez Bustamante
Comité Organizador
Doctor en Química Teórica
Facultad de Ciencias Químicas, BUAP
SNII III
Área de Fisicoquímica y Química Cuántica



francisco.melendez@correo.buap.mx



2222295500 ext 2830



Dra. Nallely Téllez Méndez
Comité Organizador
Doctora en Ciencias Químicas
Facultad de Ciencias de la Electrónica, BUAP
Área de Fisicoquímica y Electroquímica



nallely.tellez@correo.buap.mx



Dra. Maria Eugenia Castro Sánchez
Codelegada
Doctora en Química Teórica y Computacional
Instituto de Ciencias, IQUAP, BUAP
SNII II
Área de Fisicoquímica y Química Cuántica



mareug.castro@correo.buap.mx
olimpiada.quimicapuebla@gmail.com



2222295500 ext 7738



Dr. Ángel Paillero Cisneros
Comité Organizador
Doctor en Ciencias Químicas
Facultad de Ciencias Químicas, BUAP
SNII C
Área de Química Orgánica



angel.pailleros@correo.buap.mx



2222295500 ext 7522



Dra. Thania Alexandra Ferreira Garcia
Comité Organizador
Doctora en Ciencias Químicas
Universidad del Valle de México-Campus Pue
SNII I
Área de Química Analítica



thania.ferreira@uvmmnet.edu



2222299171 ext 21222

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.

Conflicto de interés

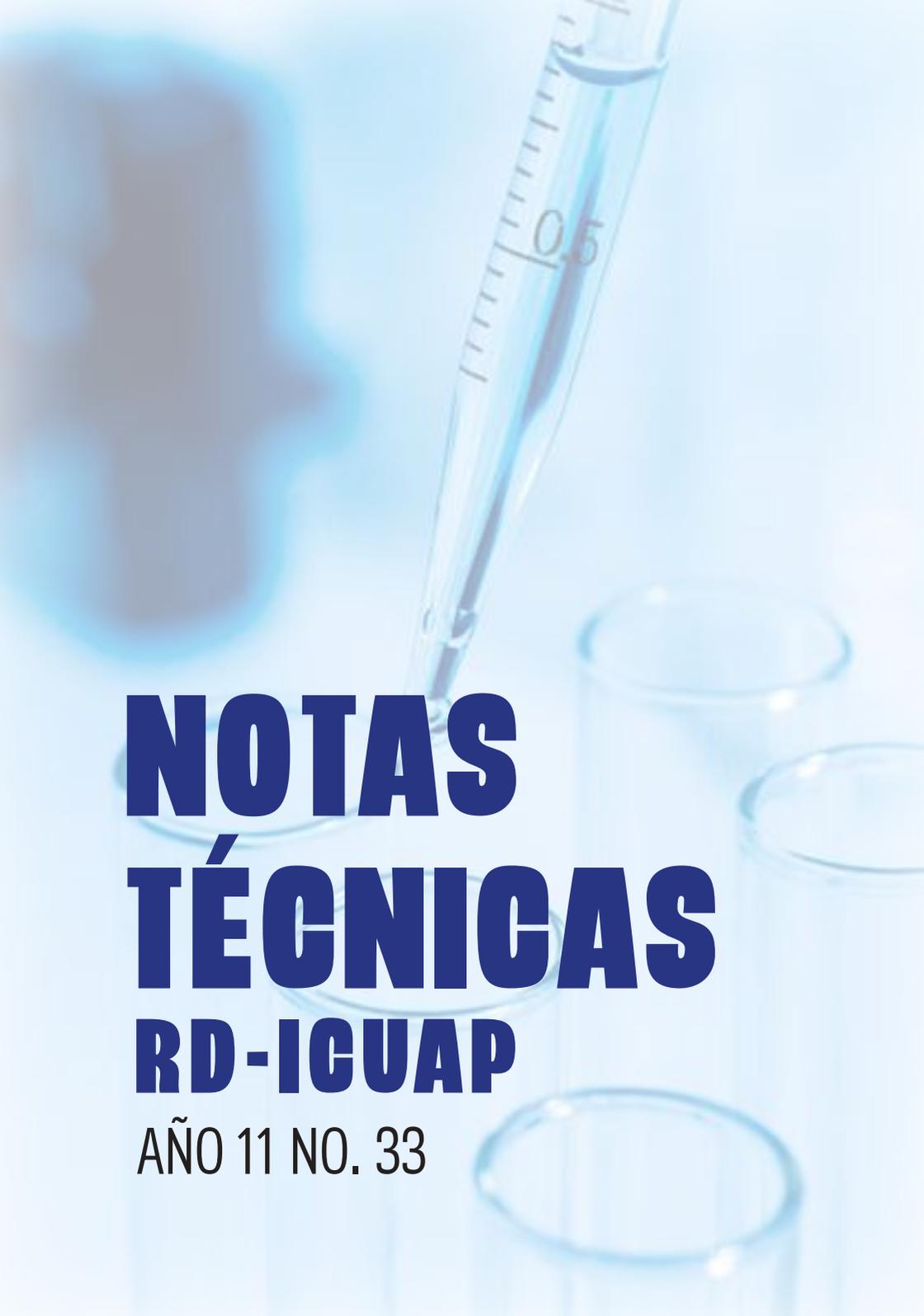
Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Facultad de Ciencias Químicas, BUAP (gestión 2015-2024), al Instituto de Ciencias (ICUAP-BUAP), a la Vicerectoría de Investigación y Estudios de Posgrado (VIEP, BUAP), a la Dirección de Comunicación Institucional (DCI-BUAP), al Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Puebla (CONCYTEP), a RD-ICUAP, a Radio BUAP y a TV BUAP por el apoyo y la difusión de nuestros eventos. Agradecemos a The Piano Studio, a Michi Lector, a Kúkara Games, a aly Toons, a Neotraba, a Shoperya y The Italian Coffee por sus patrocinios y apoyo en la realización de talleres y eventos. Agradecemos a la Preparatoria Benito Juárez García-BUAP, Colegio Central A.C. de Puebla, COBAEP Plantel 3, Instituto Francisco Esqueda, al Bachillerato de la UVP, al CECyTE Plantel Cholula, al Colegio Euro Liceo y a la Preparatoria Emiliano Zapata-BUAP por prestarnos sus instalaciones, recursos y apoyo para la organización de las Olimpiadas Estatales de Química 2015-2025, y al Bachillerato de la Universidad del Valle de México que prestará sus instalaciones y recursos para llevar a cabo el selectivo que nos representará en la XXXV Olimpiada Nacional de Química en 2026.

Referencias

- Asociación Mexicana de Química Analítica (2024). AMQA. <https://www.amqa.org.mx/>
- Barón Pinto, L. (2020). Formación temprana en investigación: Una necesidad en Colombia y América Latina. *Revista Oratores*, (10), 28-45. <https://doi.org/10.37594/oratores.n10.312>
- BUAP. (2022). Estudiantes de preparatorias BUAP ganan medallas de bronce en las olimpiadas Mexicana de Física y Nacional de Química. <https://boletin.buap.mx/node/2722>
- CONCyTEP (2024). Destaca aprendiz del COBAEP en Olimpiada Nacional de Química. CONCyTEP. <https://puebla.gob.mx/index.php/noticias/item/15754-destaca-aprendiz-del-cobaep-en-olimpiada-nacional-de-quimica>
- Meza, K. (2020). Estudiante BUAP gana segundo lugar en Olimpiada Nacional de Química. <https://www.elsoldepuebla.com.mx/local/estudiante-buap-gana-segundo-lugar-en-olimpiada-nacional-de-quimica-puebla-educacion-4754679.html>
- Olimpiada Nacional de Química, Academia Mexicana de Ciencias (2025) (<https://amc.edu.mx/olimpiada-de-quimica/>)
- Olimpiada Nacional de Química. (2015). Academia Mexicana de Ciencias. https://www.amc.edu.mx/amc/index.php?option=com_content&view=article&id=84&Itemid=80
- Página de Facebook de la Olimpiada Nacional de Química Delegación Puebla: (<https://www.facebook.com/share/18VgduyTML/?mibextid=LQQJ4d>)
- Staff (2022). Estudiante de la BUAP obtiene medalla de plata. <https://www.poblanerías.com/2022/07/buap-olimpiada-estatal-de-quimica/>



NOTAS TÉCNICAS RD-IGUAP

AÑO 11 NO. 33

INNOVANDO EL SÁNDWICH DE PEROVSKITA BARATO Y MÁS ESTABLE

INNOVATING THE CHEAP AND MORE STABLE PEROVSKITE SANDWICHEFFORT

- (1) Evelyn B. Dfáz-Cruz*
- (2) E. Regalado-Pérez
- (3) Diego Elizondo Delgado
- (4) Julio Villanueva Caba

Instituto de Física “Ing. Luis Rivera Terrazas”, Benemérita
Universidad Autónoma de Puebla, San Pedro Zacachimalpa 72960
Puebla, México

Correos:
dcebetsabe@gmail.com* 4421813980
eulises@ifuap.buap.mx
diego.elizondo@alumno.buap.mx
juliovc@ifuap.buap.mx

<https://orcid.org/0000-0002-3219-129X>
<https://orcid.org/0000-0002-8665-9468>
<https://orcid.org/0009-0008-5652-3122>
<https://orcid.org/0000-0002-6261-9197>

FOLIO: A11N97.25/1013

Resumen

Las celdas solares de perovskita se han consolidado como una de las tecnologías más prometedoras en el ámbito de la energía fotovoltaica, gracias a su alta eficiencia, bajo costo de producción y amplia versatilidad para diversas aplicaciones. Desde su primera demostración en 2009, estas celdas han experimentado un rápido avance, alcanzando eficiencias superiores al 26% en condiciones de laboratorio, comparables e incluso competitivas con las celdas de silicio cristalino, que dominan actualmente el mercado. A pesar de esto, las celdas de perovskita enfrentan retos importantes que dificultan su comercialización, siendo los más relevantes su inestabilidad frente a la humedad, el oxígeno y temperaturas superiores a 80°C. Además, la escalabilidad de fabricación aún requiere mejoras sustanciales que permitan reproducibilidad, bajo costo y compatibilidad con la producción a gran escala. Ante este panorama, resulta fundamental desarrollar soluciones tecnológicas que permitan la fabricación de dispositivos eficientes utilizando infraestructura mínima. Aquí nosotros informamos sobre la fabricación de celdas solares de perovskita completamente realizadas en un laboratorio de la BUAP, utilizando contactos eléctricos de bajo costo y con alto potencial de escalabilidad. Estos avances contribuyen al fortalecimiento de la autonomía científica y tecnológica de la institución, promoviendo su independencia en el desarrollo de energía limpia.

Palabras claves: celdas solares de perovskita, carbón, bajo costo, estabilidad

Abstract

Perovskite solar cells are one of the most promising new solar cell technologies, thanks to their high efficiency, low production costs, and flexibility for various applications. Since their initial demonstration in 2009, they have undergone rapid improvements, achieving lab efficiencies above 26%, which is close to that of traditional silicon-based solar panels. However, despite their impressive performance, perovskite cells still face significant challenges before they can be widely used, particularly their sensitivity to moisture, oxygen, and high temperatures, which impact their long-term stability. Making these cells scalable for industrial production also requires simple and low-cost manufacturing methods. In this context, being able to build efficient solar cells with basic equipment is a key step toward making this technology more accessible. In this article, we present for the first time the complete fabrication of perovskite solar cells at BUAP using low-cost carbon contacts. These contacts offer great potential for scaling up production. Our results show how universities can develop their own technologies and strengthen scientific independence through local innovation.

Keywords: perovskite solar cells, carbon, low cost, stability

A nivel global, las celdas solares de perovskita (Díaz-Cruz et al., 2025) han demostrado un crecimiento notable en eficiencia, alcanzando valores superiores al 26% en condiciones de laboratorio (Zhao et al., 2025), lo que las posiciona como una alternativa altamente competitiva frente a las tecnologías convencionales basadas en silicio. Sin embargo, a pesar de sus ventajas en costo y facilidad de procesamiento, la estabilidad a largo plazo y la escalabilidad de la producción siguen siendo los principales desafíos para su comercialización (R. Wang et al., 2019). Factores como la degradación inducida por la humedad, el oxígeno y la temperatura, así como la compatibilidad de los materiales con procesos industriales a gran escala, han impulsado esfuerzos globales para mejorar la durabilidad y viabilidad comercial de estos dispositivos.

En México, diversas instituciones académicas y empresas han reconocido el potencial transformador de esta tecnología y han establecido líneas de investigación enfocadas en superar estas limitaciones. Entre las colaboraciones más destacadas en el ámbito industrial, el Instituto de Energías Renovables de la UNAM (IER-UNAM), en conjunto con la empresa Solarever (Nuevos hallazgos en la investigación de la perovskita para la generación de energía fotovoltaica, 2024), trabajan en el escalamiento de dispositivos de perovskita mediante métodos de deposición de área grande, optimizando la uniformidad de las películas y reduciendo el uso de solventes críticos en el proceso de fabricación. Paralelamente, la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), ha consolidado una línea de investigación enfocada en la fabricación de celdas solares de perovskita completamente desarrolladas dentro de la institución. Además, los esfuerzos para mejorar la estabilidad de estos dispositivos pueden abrir nuevas oportunidades de colaboración con otras instituciones nacionales e incluso con empresas privadas interesadas en la industrialización de esta tecnología.

La fabricación de una celda solar de perovskita con altos estándares de ren-

dimiento implica múltiples desafíos (Li et al., 2020). Uno de los principales aspectos es la necesidad de ambientes controlados, como cajas de guantes con atmósfera inerte, normalmente de nitrógeno (N₂), debido a que los materiales que se utilizan en su fabricación son sensibles al medio ambiente (humedad y oxígeno). Asimismo, aunque muchas de las capas que conforman la celda pueden fabricarse por métodos de solución química, tal como el método de rotación (spin coating), la etapa final de fabricación, el depósito de los contactos eléctricos, representa un reto considerable. Comúnmente, este proceso se realiza mediante evaporación térmica en alto vacío, una técnica que requiere temperaturas elevadas y equipos especializados con costos que superan el millón de pesos (Behrouznejad et al., 2016). Además, los contactos eléctricos convencionales suelen estar compuestos por oro (Au), que ofrece un excelente acople con el material sobre el cual se deposita, lo cual se conoce también como alineación de los niveles energéticos y estabilidad química. Sin embargo, el alto costo del Au limita la viabilidad comercial de estos dispositivos. Se han explorado alternativas como la plata (Ag) y el aluminio (Al), sin embargo, estos metales presentan desafíos adicionales: la plata penetra a través de todas las capas de la celda solar, mucho más que el Au, acelerando la degradación del dispositivo, mientras que el aluminio introduce barreras de contacto que afectan la extracción eficiente de carga (De Freitas et al., 2023).



Figura 1. Celda Solar de Perovskita con contactos de Carbón obtenida en el Laboratorio de Celdas Emergentes (elaboración propia, fotografía tomada desde VAL-2, Ecomcampus Valsequillo, BUAP)

Dado el alto costo y los desafíos técnicos asociados con la deposición metálica por evaporación, una de las principales metas para abaratar los costos de producción de esta tecnología ha sido desarrollar un método alternativo para la fabricación de contactos sin recurrir a equipos de alto vacío. En el año 2024, en el laboratorio de Celdas Emergentes del IFAUP, se logró la implementación de una tinta de carbón como material conductor, eliminando la necesidad de metales costosos y técnicas de deposición sofisticadas. No obstante, este enfoque trajo consigo nuevos retos, principalmente relacionados con la compatibilidad de la tinta con las demás capas de la celda. Se observó que la capa transportadora de huecos (HTL) convencional no resistía las condiciones de procesamiento de la tinta de carbón, por lo que fue necesario sustituirla por un material más estable térmicamente, con niveles energéticos que permitieran un acople adecuado entre ellos. Estos avances han permitido desarrollar un enfoque novedoso para la fabricación de celdas solares de perovskita en México, con un potencial significativo para aplicaciones de bajo costo y mayor estabilidad a largo plazo.

¿Cómo funciona una celda solar de perovskita?

Una celda solar de perovskita convierte la luz solar en electricidad mediante una capa activa formada por un material absorbedor de luz, que es una perovskita híbrida, formada de materiales orgánicos e inorgánicos. En nuestro caso, empleamos FAMAPbI₃, una perovskita en la que FA corresponde a formamidinium, un catión orgánico con la fórmula química CH(NH₂)₂. En esta estructura, MA es el catión metilamonio, Pb es el metal central, y el yodo (I₃) actúa como el anión que se une al plomo para formar la estructura de perovskita (Regalado-Pérez et al., 2025).

Las celdas solares de perovskita se construyen en una configuración por capas, muy parecida a un sándwich. La gran diferencia es que este "sándwich solar" es **ultradelgado**. Todas sus capas juntas tienen un espesor de apenas **1100 nanómetros (nm)**, es decir, una milésima parte del grosor de un cabello humano y unas

mil veces más delgadas que la pantalla táctil de un celular. En esta estructura, la perovskita cumple el papel del jamón: el ingrediente principal que convierte la luz en electricidad. Esta capa queda "ensandwichada" entre dos contactos encargados de extraer las cargas, como si fueran los panes. Al frente (por donde incide la luz solar), se coloca un vidrio conductor transparente llamado **FTO** (por sus siglas en inglés, óxido de estaño dopado con flúor), que actúa como el pan de base sobre el cual se apilan los demás ingredientes. En la parte posterior se ubica un contacto metálico, normalmente de **oro, que sería el pan que completa el sándwich**. Además de estos contactos, la celda incluye otras capas esenciales, que la hacen mejorar, como los otros ingredientes en el sándwich. Antes de la perovskita se coloca la **capa transportadora de electrones (ETL)**, que podemos comparar con el jitomate del sándwich. Después de la perovskita, se encuentra la **capa transportadora de huecos (HTL)**, que cumple el papel de la lechuga. Esta analogía nos ayuda a visualizar de manera sencilla cómo se organiza la celda solar de perovskita, tal como se observa en la **Figura 2**.

Estos dispositivos pueden construirse con dos tipos de estructura, dependiendo del lado por donde incide la radiación (luz) en la celda solar, es decir, puede entrar a través de la **capa ETL** (el "jitomate") o de la **capa HTL** (la "lechuga"). Para que esto sea posible, el material por donde entra la luz debe ser **transparente a la radiación solar**. La configuración más común es aquella donde la luz entra por la **ETL**, conocida como estructura **n-i-p**. En esta, la ETL corresponde a un material semiconductor tipo-n; uno de los más empleados es el dióxido de titanio (TiO₂). Sobre ella se deposita la capa activa de **perovskita**, que funciona como material semiconductor tipo-i (intrínseco). Para más detalles sobre su fabricación, se puede consultar la metodología descrita en (Díaz-Cruz et al., 2025). Encima de la perovskita se coloca la **HTL**, que actúa como material semiconductor tipo-p. El más utilizado es **Spiro-OMeTAD**, aunque existen alternativas más económicas y estables como el **CuSCN**. Finalmente, se agregan los **contactos eléctricos** que completan la celda solar. En nuestra investigación, hemos empleado **electrodos de carbón** como una

opción alternativa a los convencionales de Au, lo que representa un enfoque más accesible y sostenible.

El principio de funcionamiento de las celdas solares de perovskita se basa en cuatro pasos principales, a partir del efecto fotovoltaico (Copeland et al., 1942), esquematizados en la **Figura 2b**: 1) La absorción de luz, en donde la capa de perovskita absorbe la luz solar en el rango visible e infrarrojo cercano, generando cargas libres, es decir, pares electrón-hueco (negativas-positivas). 2) Generación y separación de cargas: En la capa de perovskita, los electrones y huecos generados son atraídos (separados) por las capas ETL y HTL, respectivamente, para evitar que estos se atraigan mutuamente (recombinación). 3) Transporte de cargas: En este paso, los electrones se trasladan (transportan) hacia la ETL o TiO₂ (jitomate), mientras que los huecos lo hacen hacia la HTL o CuSCN (lechuga). Y 4) Extracción y generación de corriente: Finalmente, las cargas llegan a los electrodos (panes), en este caso FTO y carbón, en donde hacen fluir electrones a través del circuito externo, generando la electricidad.

Sustitución del Oro por Contactos de Carbón

Los contactos eléctricos de pasta de carbón son una alternativa a los contactos de oro, plata o aluminio que se utilizan normalmente para celdas solares de perovskita (Bogachuk et al., 2020). Su depósito se hace con dos sencillas técnicas de procesamiento; una de ellas es doctor blade o blade coating (impresión por arrastre de cuchillas), y la otra técnica es serigrafía o screen printing, la cual es una técnica muy similar a la utilizada en el estampado de ropa/playeras. Estas técnicas ofrecen varias ventajas sobre las tradicionales, como la evaporación. La principal ventaja es su fácil procesamiento sin reactivos ni equipos costosos, lo que reduce significativamente los costos de fabricación.

En la Figura 3 se muestra una ilustración de cómo se realiza el depósito por medio de esta técnica en 4 pasos. I) Delimitar el tamaño de los contactos con cinta, II) se coloca la pasta, III) Arrastrar con una rasqueta o vidrio a 45° con fuerza moderada, trazo uniforme y velocidad constante para obtener un recubrimiento homogéneo y IV) se seca el solvente a 65°C por 30 minutos.

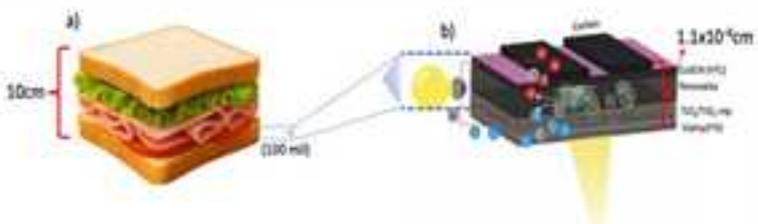


Figura 2. a) Estructura de un sándwich de jamón y b) Esquema del funcionamiento de una celda solar de perovskita con estructura normal n-i-p. (elaboración propia)

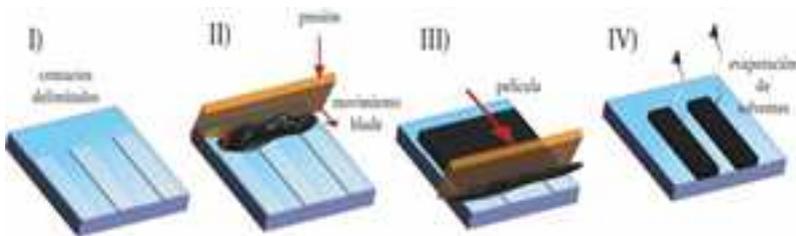


Figura 3. Ilustración de la técnica de doctor blade (elaboración propia)

Así como con un sándwich sabemos que tan bueno es hasta que lo probamos, primero lo olemos y luego le damos una buena mordida, las celdas solares de perovskita también necesitan ser “probadas” para demostrar que tan bien convierten la luz del Sol en electricidad. Esa “mordida de prueba” se llama medición de la eficiencia de conversión y se obtiene a partir de las curvas de densidad de corriente contra voltaje (J-V) bajo condiciones de iluminación estándar equivalentes a un Sol (AM1.5G, 100 mW/cm²). Una curva J-V representativa para la celda solar de perovskita con contactos de carbón se muestra en la Figura 4. La eficiencia de conversión de energía se calcula usando la siguiente expresión:

$$\text{Eficiencia (\%)} = \frac{J_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{P} \cdot 100$$

Donde J_{sc} es la densidad de corriente de cortocircuito (mA/cm²) (círculo verde en la Figura 4), V_{oc} es el voltaje en circuito abierto (V) (círculo rojo en la Figura 4), FF es el factor de forma (en %) (recuadro amarillo en la Figura 4), P es la potencia de entrada (normalmente 100 mW/cm² bajo iluminación AM1.5G).

Ahora bien, ningún sándwich de jamón dura para siempre. Si lo dejamos fuera del refrigerador, tarde o temprano empieza a descomponerse, y ya no es seguro comerlo. Algo parecido pasa con las perovskitas: también tienen un “tiempo de vida” limitado, a esto se le llama estabilidad, que depende de varios factores como la humedad, el oxígeno y la radiación ultravioleta (UV), entre otros.

En las celdas solares de perovskita, la estabilidad se evalúa vigilando cómo cambian sus parámetros fotovoltaicos con el tiempo (círculos verde, morado y rojo de la Figura 4), siendo la eficiencia uno de los más importantes. En otras palabras, igual que con un sándwich, lo interesante no es solo qué tan rico (o eficiente) es al principio, sino cuánto tiempo puede mantenerse en buenas condiciones antes de “echarse a perder”.

En la Figura 5 se muestra la comparación de dos tipos de celdas solares de perovskita que fueron monitoreadas durante cinco meses para medir su durabilidad, variando tanto la capa HTL (la “lechuga”) como el tipo de contacto eléctrico (el “pan”), ya sea de carbón o de oro.

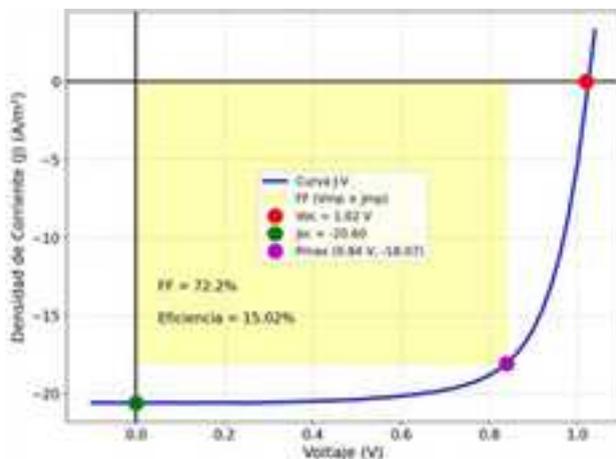


Figura 4. Curva Densidad de corriente contra Voltaje (J-V) para una celda solar de perovskita con contactos de carbón, medida bajo una intensidad de iluminación igual a 1 Sol. Los círculos: verde, morado y rojo señalan la densidad de corriente, potencia máxima y voltaje de circuito abierto

Es como comparar dos sándwiches de jamón: en el primero usamos un pan artesanal, que en este caso sería el oro, más costoso y sin conservadores, que además obliga a usar una lechuga especial tipo sangría, equivalente al Spiro-OMeTAD, también cara y delicada; mientras que en el segundo optamos por un pan tradicional, que sería el carbón, más económico y con conservadores, que combina perfectamente con una lechuga romana, equivalente al CuSCN, más barata y resistente. En la gráfica, la línea negra representa la celda solar con contactos de carbón, es decir, el “sándwich económico”, mientras que la línea amarilla corresponde a la celda con contactos de oro, el “sándwich gourmet”, y el resultado es evidente: el sándwich caro se echa a perder mucho más rápido.

La celda con oro y Spiro-OMeTAD perdió la mitad de su eficiencia en solo cinco meses, debido a que el oro tiende a difundirse hacia otras capas (S. Wang et al., 2016), formando pequeños canales por los que entran humedad y oxígeno, los principales responsables de degradar la perovskita (Yang et al., 2015). En contraste, la celda con contactos de carbón y CuSCN como HTL conservó el 93 % de su eficiencia inicial en el mismo periodo, mostrando una notable mejora en estabilidad. Esto demuestra que los contactos de carbón no solo reducen costos, sino que también ofrecen mayor durabilidad, lo que los con-

vierte en una alternativa prometedora para aplicaciones de largo plazo, es decir, para su uso comercial.

En resumen, mientras que el Spiro-OMeTAD sigue siendo el material más popular para fabricar la HTL, su alto costo y su sensibilidad limitan el desempeño a largo plazo. En cambio, el CuSCN se perfila como una opción más económica y estable, acercando a las perovskitas un paso más hacia su comercialización.

Evaluación de costos y viabilidad comercial de celdas solares de perovskita con CuSCN y carbón

En la **Figura 6** se presentan los costos estimados de fabricación de celdas solares de perovskita, con un desglose detallado de los materiales empleados. Para un dispositivo de laboratorio con dimensiones de $2 \times 2 \text{ cm}^2$, se estima que el costo del sustrato de vidrio recubierto con óxido conductor transparente (FTO), más la capa de TiO_2 compacto, más el TiO_2 mesoporoso, más la capa activa de perovskita (formada por FAI , PbI_2 , MABr y PbBr_2), asciende a aproximadamente \$30.72 MXN. Este valor resulta competitivo y alentador desde el punto de vista del escalamiento industrial, sobre todo considerando que corresponde a las partes más críticas de la celda en términos de generación de carga y eficiencia de conversión.

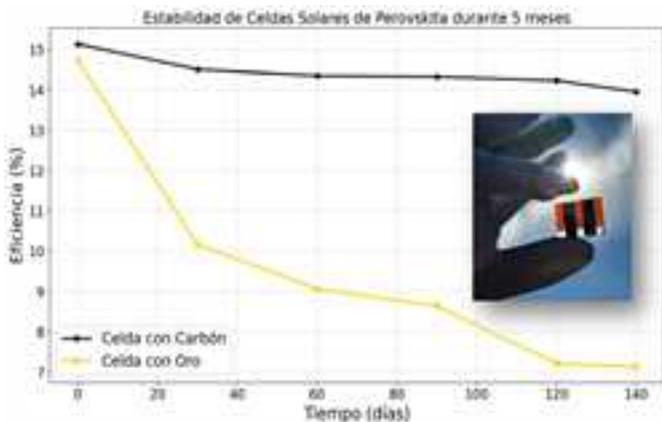


Figura 5. Monitoreo de la estabilidad para celdas solares de perovskita, con dos contactos diferentes: Carbón (puntos negros) y Oro (puntos amarillos), durante 5 meses (elaboración propia)

No obstante, el costo total del dispositivo se ve fuertemente influenciado por los materiales elegidos para la capa de transporte de huecos (HTL) y los contactos eléctricos (la "lechuga" y el "pan" que complementa el sándwich). Para ilustrar esta diferencia, se compararon dos configuraciones distintas: I) Una celda que emplea CuSCN como HTL y carbón como contacto posterior (sándwich económico) vs II) una celda que utiliza Spiro-OMeTAD y Au (sándwich gourmet), que son materiales comúnmente usados en celdas de alta eficiencia de laboratorio. El análisis de costos revela una diferencia sustancial: la celda con CuSCN y carbón tiene un costo total estimado de \$32.78 MXN. En contraste, la celda con Spiro-OMeTAD y Au alcanza un costo de \$261.72 MXN. Esto representa un incremento de \$228.94 MXN, es decir, aproximadamente 8 veces más costoso cuando se utilizan materiales como el oro y el Spiro-OMeTAD. Este aumento se debe, principalmente, al elevado precio del oro (~600 USD/g) y del Spiro-OMeTAD (~564 USD/g), además de los requerimientos técnicos asociados, como la deposición al vacío mediante evaporación térmica para los contactos metálicos.

La sustitución de estos materiales costosos por alternativas como CuSCN y carbón no solo reduce drásticamente el costo de fabricación, sino que también ofrece ventajas en términos de procesabilidad y compatibilidad con técnicas de producción en masa: El CuSCN puede ser procesado a baja temperatura (70°C) y depositado mediante técnicas como spin-coating o impresión de tinta, mientras que el carbón, en forma de tinta o pasta, puede aplicarse por métodos de bajo costo como serigrafía, rodillo o doctor blade, sin necesidad de atmósferas controladas ni equipos complejos.

A gran escala, y considerando las economías de escala en la producción de módulos de 1 m², se estima que un panel solar de perovskita con arquitectura basada en CuSCN y carbón podría fabricarse por menos de \$500–800 MXN/m² (~25–40 USD/m²), dependiendo de la infraestructura utilizada. Este costo es considerablemente menor en comparación con tecnologías basadas en silicio (~60–100 USD/m²) o en perovskitas con contactos metálicos (~100–200 USD/m²).

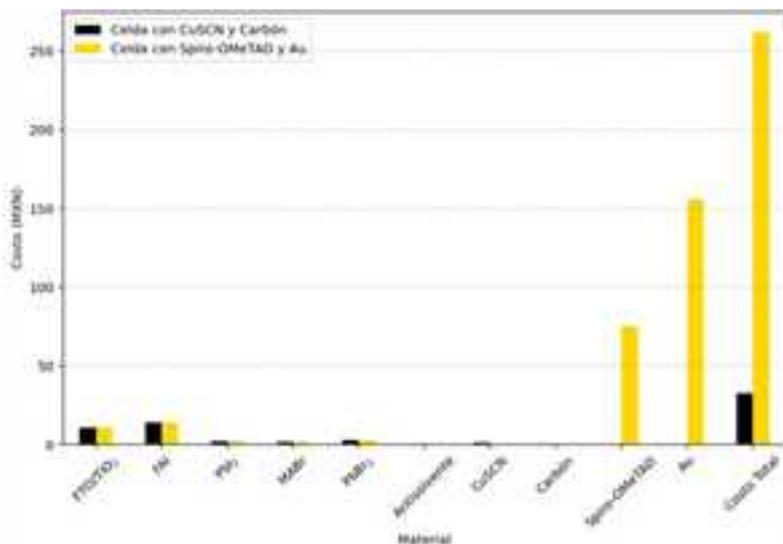


Figura 6. Comparación de costos para la producción de una celda solar de perovskita (dimensiones de 2x2 cm²) con contactos de carbón y oro (elaboración propia).

Hasta ahora, el uso de contactos de carbón en las celdas solares de perovskita ha mostrado una mejora notable en la estabilidad frente a los contactos metálicos tradicionales, como el oro. Sin embargo, estos dispositivos aún deben conservarse en ambientes con humedad controlada, ya que la exposición al agua sigue siendo uno de los principales factores de degradación. Esto representa un reto importante para su uso en condiciones reales, fuera del laboratorio. Uno de los grandes desafíos actuales es desarrollar recubrimientos o encapsulados que protejan eficazmente las celdas sin elevar demasiado los costos ni complicar su fabricación. Además, se busca reemplazar el plomo presente en muchas de estas celdas solares por

materiales menos tóxicos, como estaño, bismuto o antimonio, sin sacrificar la eficiencia ni la estabilidad del dispositivo.

Por otro lado, llevar estas tecnologías del laboratorio a la industria también implica superar barreras técnicas. Fabricar celdas de mayor tamaño y de manera uniforme requiere métodos como la impresión o la coevaporación, que aún están en proceso de optimización. A esto se suma la necesidad de simplificar la fabricación: muchos métodos actuales dependen de atmósferas controladas o equipos especializados. Por ello, uno de los retos más relevantes es adaptar los procesos para que puedan realizarse en condiciones ambientales comunes, manteniendo su rendimiento y durabilidad.

Conclusiones

La fabricación de celdas solares de perovskita con contactos de carbón ha sido como preparar un nuevo tipo de sándwich en la BUAP: aunque no siempre tuvimos todos los ingredientes más caros o el horno más moderno, supimos improvisar en la cocina y logramos un resultado funcional y sabroso.

Uno de los principales logros fue cambiar el pan gourmet de oro por un pan mucho más sencillo y económico de carbón, que no solo mantuvo el sabor del sándwich, sino que además lo hizo más accesible y fácil de replicar. Este cambio abre la posibilidad de preparar muchos más sándwiches,

mejor dicho, celdas solares, a gran escala y con menor costo, algo fundamental para pensar en un menú energético nacional.

Además, evaluamos directamente cuánto tiempo nuestro “sándwich solar” se mantiene fresco frente a la humedad, el calor y la luz intensa, generando datos clave sobre su estabilidad y confiabilidad. Este conocimiento refuerza la autonomía científica de la institución y sienta las bases para seguir perfeccionando la receta, con miras a desarrollar tecnologías limpias adaptadas al paladar y a las necesidades energéticas de nuestro país.

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.

Conflicto de interés

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

Agradecimientos

Este trabajo fue soportado con el apoyo del Proyecto: CONACYT CF-2019-848260. Los autores E.B.D.C y E.R.P agradecen a la beca de Investigadores por México M2.

Referencias

- Behrouznejad, F., Shahbazi, S., Taghavinia, N., Wu, H.-P., & Wei-Guang Diao, E. (2016). A study on utilizing different metals as the back contact of CH₃NH₃PbI₃ perovskite solar cells. *Journal of Materials Chemistry A*, 4(35), 13488-13498. <https://doi.org/10.1039/C6TA05938D>
- Bogachuk, D., Zouhair, S., Wojciechowski, K., Yang, B., Babu, V., Wagner, L., Xu, B., Lim, J., Mastroianni, S., Pettersson, H., Hagfeldt, A., & Hinsch, A. (2020). Low-temperature carbon-based electrodes in perovskite solar cells. *Energy & Environmental Science*, 13(11), 3880-3916. <https://doi.org/10.1039/D0EE02175j>
- Copeland, A. Wallace., Black, O. D., & Garrett, A. B. (1942). The Photovoltaic Effect. *Chemical Reviews*, 31(1), 177-226. <https://doi.org/10.1021/cr60098a004>
- De Freitas, J. N., De Moraes, A., Silva Filho, J. M. C., & Marques, F. D. C. (2023, octubre 18). Stability of Metal Contacts in Perovskite Solar Cells. *Proceedings of the Asia-Pacific International Conference on Perovskite, Organic Photovoltaics and Optoelectronics. 7th Asia-Pacific International Conference on Perovskite, Organic Photovoltaics and Optoelectronics, Tokyo, Japan.* <https://doi.org/10.29363/nanoge.iperop.2024.040>
- Díaz-Cruz, E. B., Regalado-Pérez, E., Santos-Cruz, J., Alvarado, J., Meneses-Rodríguez, D., & Villanueva-Cab, J. (2025). Temperature-Dependent Li⁺ Diffusion and Its Influence on Doping Profile and Stability of Perovskite Solar Cells. *ACS Applied Energy Materials*, 8(7), 4331-4344. <https://doi.org/10.1021/acsaem.4c03247>
- Nuevos hallazgos en la investigación de la perovskita para la generación de energía fotovoltaica. (2024, junio 4). *pv magazine Mexico*. <https://www.pv-magazine-mexico.com/2024/06/04/nuevos-hallazgos-en-la-investigacion-de-la-perovskita-para-la-generacion-de-energia-fotovoltaica/>
- Regalado-Pérez, E., Díaz-Cruz, E. B., & Villanueva-Cab, J. (2025). Impact of the hole transport layer on the space charge distribution and hysteresis in perovskite solar cells analysed by capacitance–voltage profiling. *Sustainable Energy & Fuels*, 9(5), 1225-1235. <https://doi.org/10.1039/D4SE01262C>

PARCHES ELÉCTRICOS PARA OPTIMIZACIÓN EN LA CICATRIZACIÓN DE HERIDAS

ELECTRICAL PATCHES FOR WOUND HEALING
OPTIMIZATION

V. Guzmán- Cruz *(1)
A. Luna- Juárez* (2)
F. Montiel- Guzmán (3)
R. Pérez-López (4)
C. Sánchez-Guillén (5)
A. Ramírez-Benítez (6)
J. Alvarado (7).

V. Guzmán- Cruz* & A. Luna- Juárez
2228335103 *

Correos:

gc202336462@alm.buap.mx
lj202338306@alm.buap.mx
mg202348254@alm.buap.mx
pl202350781@alm.buap.mx
sg202377508@alm.buap.mx
rb202351849@alm.buap.mx
joaquin.alvarado@correo.buap.mx

<https://orcid.org/0009-0005-5871-5214>
<https://orcid.org/0009-0006-4396-1276>
<https://orcid.org/0009-0002-9353-5612>
<https://orcid.org/0009-0005-0323-2004>
<https://orcid.org/0009-0005-2241-1075>
<https://orcid.org/0009-0002-9212-8214>
<https://orcid.org/0000-0001-7186-4429>

Folio: A11N106.25/1022

ISSN 2448-5829

Año 11, No. 33, 2025, pp. 205 -222

RD-ICUAP

Resumen

Las heridas crónicas representan un desafío creciente para los sistemas de salud y afectan gravemente la calidad de vida de los pacientes, limitando su funcionalidad y generando consecuencias emocionales, sociales y económicas. Estas lesiones, cuya cicatrización es deficiente, pueden derivar en complicaciones como infecciones, gangrena o amputaciones, especialmente en personas con enfermedades como la diabetes. La Wound Healing Society (2025) las clasifica en cuatro tipos principales: úlceras diabéticas, venosas, arteriales y por presión, siendo estas últimas comunes en adultos mayores inmovilizados (Hernández et al., 2023). Si bien existen terapias avanzadas como el uso de células madre o plasma rico en plaquetas, su alto costo limita su acceso. En contraste, la electroestimulación, particularmente con microcorrientes (mA), surge como una alternativa accesible y prometedora para acelerar la cicatrización tanto en heridas crónicas como agudas. En el marco del reto de investigación de la materia de Biofísica de la Licenciatura en Biotecnología, nos planteamos la siguiente pregunta: ¿La aplicación de microcorrientes es efectiva como tratamiento complementario en la cicatrización de heridas crónicas en fase temprana?

Nuestro objetivo es diseñar un protocolo de estimulación eléctrica con corriente alterna monofásica, utilizando parches eléctricos como herramienta principal.

Palabras Clave: Heridas Crónicas; Cicatrización; Electroestimulación; Microcorriente; Tratamiento complementario; Regeneración tisular; Calidad de vida; Sistema de salud.

Abstract

Las Chronic wounds are a growing challenge for healthcare systems and severely impact patients' quality of life, limiting their functionality and causing emotional, social, and economic consequences. These lesions, which heal poorly, can lead to complications such as infections, gangrene, or amputations, especially in people with diseases like diabetes. The Wound Healing Society (2025) classifies them into four main types: diabetic, venous, arterial, and pressure ulcers, with the latter being common in immobilized older adults (Hernández et al., 2023).

While advanced therapies like stem cells or platelet-rich plasma exist, their high cost limits access. In contrast, electrotherapy, particularly with microcurrents (mA), emerges as an accessible and promising alternative to accelerate healing in both chronic and acute wounds.

Our Research Question

Within the framework of a research challenge for a Biophysics course in the Biotechnology program, we posed the following question: Is the application of microcurrents an effective complementary treatment for the early-stage healing of chronic wounds?

Our goal is to design an electrical stimulation protocol using monophasic alternating current, with electrical patches as the main tool.

Keywords: Chronic Wounds; Wound Healing; Electrotherapy; Micro-current; Complementary Treatment; Tissue Regeneration; Quality of Life; Healthcare System.

Estimulación eléctrica en la medicina regenerativa: Avances y desafíos actuales

Las heridas crónicas representan un problema clínico y de salud pública por su difícil curación y alta prevalencia. Su proceso de reparación involucra varias fases (hemostasia, inflamación, proliferación, contracción y remodelación), pero puede verse interrumpido por factores como la diabetes, edad avanzada, insuficiencia vascular o malnutrición (Greaves et al., 2013). (Figura 1).

Cuando no hay avances en la cicatrización en un periodo menor a 42 días, se clasifica como herida crónica. Estas lesiones afectan la calidad de vida de los pacientes e imponen una carga económica y social significativa, sobre todo en contextos con recursos sanitarios limitados, como México (Flores et al., 2023).

Ante este panorama, la electroestimulación surge como una alternativa prometedora. Este método se basa en la galvanotaxis, migración celular inducida por campos eléctricos débiles que imitan señales bioeléctricas del cuerpo (Porras et al., 2018). Estas señales influyen en células clave del proceso de cicatrización, pudiendo reducir infecciones, mejorar la inmunidad celular y acelerar la cicatrización de heridas cutáneas.

Durante la fase inflamatoria, la electroestimulación mejora la oxigenación, la perfusión sanguínea, reduce el edema y potencia el efecto antibacteriano. En la proliferativa, estimula la contracción de la herida, reorganización del colágeno y la síntesis de ADN y proteínas (Senet, 2016). En la remodelación, miofibroblastos migran de manera dirigida, facilitando el cierre efectivo del tejido (Porras et al., 2018).

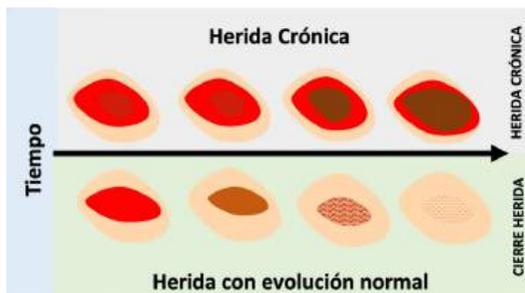


Figura 1. Comparación entre una herida crónica y una herida con evolución normal. La principal diferencia es que la herida crónica no cierra en el tiempo esperado (Bowers & Franco, 2020).

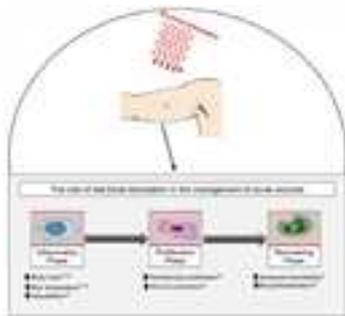


Figura 2. Intervención de la electroestimulación en el proceso de cicatrización (Din & Bayat, 2014)

Cicatrización de heridas: fases y factores

La cicatrización se desarrolla en cuatro fases solapadas (Figura 3). La coagulación detiene la hemorragia mediante coágulos formados por plaquetas que liberan mediadores para atraer células inflamatorias. La inflamación elimina agentes dañinos y prepara el tejido para regenerarse, facilitando la migración de neutrófilos y monocitos. La proliferación reconstruye el tejido degradando la matriz provisional y promoviendo migración celular (Guarín-Corredor et al., n.d.). Finalmente, la maduración restaura la barrera cutánea y refuerza la matriz extracelular, remodelando colágeno tipo III hacia tipo I y formando una cicatriz resistente (Valverde, 2016).

Bases bioeléctricas de la regeneración celular y selección de materiales conductores

El cuerpo humano genera impulsos electroquímicos naturales en órganos como corazón y piel. Al lesionarse, se interrumpen estos potenciales generando "corrientes de lesión" que establecen un campo eléctrico con polo negativo en el centro de la herida y polo positivo en los bordes, detectable a 2-3 mm y con voltajes de 10 a 60 mV (Preetam et al., 2024).

Como muestra la Figura 4, esta corriente es el resultado del transporte de iones de sodio impulsado por las bombas ATPasa Na⁺/K⁺ en la epidermis (McGinnis & Venable, 1986). Esta corriente permanece activa en un ambiente húmedo, lo que favorece la cicatrización. Se estima que la tasa de curación disminuye un 25% en ausencia de esta corriente.

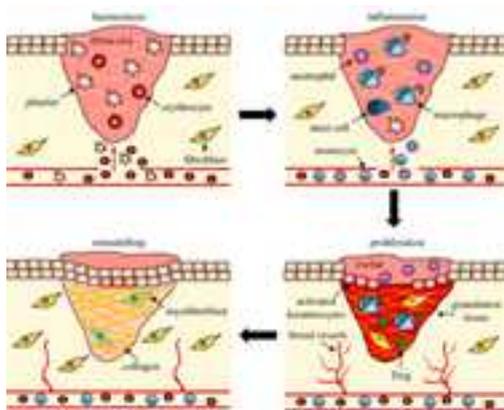


Figura 3. Fases de la cicatrización (Wilkinson & Hardman, 2020).

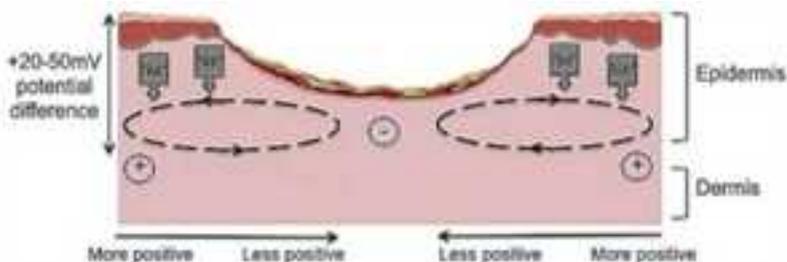


Figura 4. Bombas de ATPasa en la cicatrización (Din & Bayat, 2014)

Es importante considerar las amplitudes de estimulación y sus sensaciones fisiológicas, como se describe en la Tabla 1.

La curación exitosa de las heridas cutáneas se basa en la migración de tres tipos clave de células cutáneas: queratinocitos, fibroblastos y células endoteliales. Tabla 2 muestra algunos parámetros de electroestimulación según el tipo de les-

Tabla 1. Comparativa de amplitudes

Amplitud (mA)	Tipo de estimulación	Sensación
300-400 mA	Estimulación muscular eléctrica	Contracción muscular
150-200 mA	Estimulación nerviosa transepidérmica	Hormigueo o picor
Menor a 100 mA	Subsensorial	No se siente
Por debajo de 60 mA	Estimulación de microcorriente	X

Tabla 2. Electroestimulación aplicada a diferentes tipos de heridas con el fin de comparar los diferentes voltajes aplicados para la cicatrización de heridas.

Tipo de herida	Tipo de corriente / Voltaje aplicado	Tiempo de cicatrización	Referencia
Úlceras diabéticas, arteriales y venosas	Corriente TENS (150-250 mA, duración de fase de 1.0-0.2 mseg, frecuencia de 80 Hz)	Duración de tratamiento: 20-30 minutos (máx. 60 minutos) y se repite 2 veces al día con intervalos de 6 horas.	(Company, s.f)
Heridas isquémicas	Corriente continua de baja intensidad (LIDC) 200-800 microamperios	3 sesiones de 2 horas al día. Duración total: 9.6 semanas.	(Balakatounis, 2008)
Herida cutánea secundaria	Corriente pulsada de alto voltaje (150-500 V)	Frecuencia de pulso de 80 a 120 Hz con polaridad negativa, una duración del pulso de 40 a 100 μ s y un período de tratamiento de 25 minutos por sesión.	(Zamora et al, 2022)
Úlceras crónicas	Rango de dosis de 250-500 μ C/s	5 semanas.	(Kloth, 2013)

Métodos

3. Diseño del electroestimulador y configuración experimental

El circuito prototipo para la estimulación eléctrica (Diagrama 1) en la curación de heridas se compone principalmente de un microcontrolador Arduino UNO, encargado de generar las señales de control digitales y suministrar 5V para la activación del transistor. Un transistor NPN TIP120 actúa como interruptor electrónico para controlar el flujo de

corriente de una fuente externa de 9V hacia los electrodos (parches en contacto con la herida). Un transformador 10:1 eleva el voltaje para simular una señal de corriente alterna de mayor amplitud. La Figura 6 muestra el circuito implementado para la estimulación eléctrica.

3.3 Parámetros eléctricos utilizados

Tabla 3. Propuesta de protocolo.

Tipo de corriente	Microcorrientes
Forma de onda	Monofásica
Intensidad	3-6 mA
Frecuencia	60 Hz
Campo eléctrico	100 mV/mm
Tiempo de sesión	20 minutos
Tiempo de tratamiento	9 días

Resultados

Como parte de los resultados de nuestra investigación sobre la electroestimulación en la cicatrización de heridas, se realizaron dos incisiones lineales utilizando una navaja esterilizada en la región del bíceps de los brazos derecho e izquierdo de una persona de sexo femenino de 21 años, en buen estado de salud. La herida en el brazo derecho, con una longitud de 2.1 mm y una profundidad de 2 mm, fue sometida a tratamiento con electroestimulación, mientras que la herida en el brazo izquierdo, con una longitud de 2 mm y una profundidad de 1 mm, sirvió como grupo control sin intervención (Tabla 4).

Desde el primer día post-incisión, se observaron diferencias significativas en el proceso de hemostasia entre ambas heridas. La herida tratada con electroestimulación exhibió un sangrado más denso y controlado, lo que sugiere una activación más eficiente de los mecanismos de coagulación.

Además, en la herida sometida a microcorrientes, se evidenció una electrotaxis más regulada y una respuesta inflamatoria significativamente más leve, lo que indica una migración celular más efectiva y organizada. Con el paso de los días, la herida tratada mostró una recuperación más limpia, caracterizada por bordes bien definidos y una reducción considerable del enrojecimiento, en contraste con la herida control que presentó un cierre menos eficiente.

Finalmente, al noveno día de seguimiento, ambas heridas habían cerrado por completo; sin embargo, la herida tratada presentó una cicatrización estéticamente superior, lo que sugiere una mejor respuesta inicial en la hemostasia, una electrotaxis más eficiente y una posterior regeneración tisular más ordenada.



Figura 11. Aplicación de electroestimulación al sujeto de prueba.

Tabla 4. Resultados de electroestimulación con microcorrientes, se aplicaron 2.2 V en un periodo de 20 min por día, por nueve días

Día	Con tratamiento	Sin tratamiento
1		
3		
9		

Conclusión

Estos hallazgos preliminares respaldan la hipótesis de que la electroestimulación mejora la cicatrización al favorecer la perfusión, migración celular y modulación inflamatoria. No obstante, deben considerarse factores individuales, y emplearse como parte de un abordaje integral.

Agradecimientos

A los docentes, asesores y familiares por el apoyo brindado a lo largo de la realización de este proyecto.

Electrical stimulation in regenerative medicine: Current advances and challenges

Las Chronic wounds are a clinical and public health problem due to their difficult healing and high prevalence. Their repair process involves several phases (hemostasis, inflammation, proliferation, contraction, and remodeling), but can be interrupted by factors such as diabetes, advanced age, vascular insufficiency, or malnutrition (Greaves et al., 2013) (Figure 1).

When there is no progress in wound healing within a period of fewer than 42 days, it is classified as a chronic wound. These lesions affect patients' quality of life and impose a significant economic and social burden, especially in healthcare contexts with limited resources, such as Mexico (Flores et al., 2023).

In light of this situation, electrostimulation is emerging as a promising alternative. This method is based on galvanotaxis, a process where weak electric fields, which mimic the body's own bioelectric signals, induce cell migration (Porras et al., 2018). These signals influence key cells in the healing process, which can help to reduce infections, improve cellular immunity, and accelerate the healing of skin wounds.

During the inflammatory phase, electrostimulation improves oxygenation and blood flow, reduces swelling, and enhances the antibacterial effect. In the proliferative phase, it stimulates wound contraction, collagen reorganization, and the synthesis of DNA and proteins (Senet, 2016). Finally, in the remodeling phase, myofibroblasts migrate in a directed manner, facilitating effective tissue closure (Porras et al., 2018).



Figure 1. A comparison between a chronic wound and a normally healing wound. The main difference is that a chronic wound fails to close within the expected timeframe (Bowers & Franco, 2020).

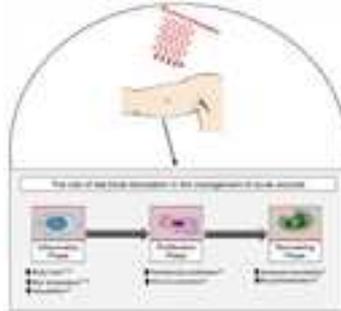


Figure 2. How electrostimulation intervenes in the wound healing process (Din & Bayat, 2014).

Wound Healing: Phases and Factors

Wound healing develops in four overlapping phases (Figure 3). Coagulation stops bleeding through clots formed by platelets, which release mediators to attract inflammatory cells. Inflammation removes harmful agents and prepares the tissue for regeneration by facilitating the migration of neutrophils and monocytes. Proliferation rebuilds the tissue by degrading the provisional matrix and promoting cell migration (Guarín-Corredor et al., n.d.). Finally, maturation restores the skin barrier and reinforces the extracellular matrix, remodeling type III collagen into type I and forming a resilient scar (Valverde, 2016).

Bioelectrical Basis of Cellular Regeneration and Selection of Conductive Materials

The human body generates natural electrochemical impulses in organs such as the heart and skin. When an injury occurs, these potentials are interrupted, creating "injury currents." These currents establish an electric field with a negative pole at the center of the wound and a positive pole at the edges, which is detectable up to 2-3 mm away and has voltages ranging from 10 to 60 mV (Preetam et al., 2024).

As shown in Figure 4, this current is the result of sodium ion transport driven by Na^+/K^+ ATPase pumps in the epidermis (McGinnis & Vanable, 1986). This current remains active in a moist environment, which promotes healing. It is estimated that the healing rate decreases by 25% in the absence of this current.

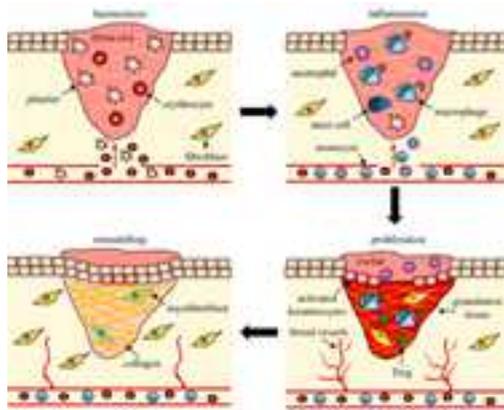


Figure 3. Phases of wound healing (Wilkinson & Hardman, 2020).

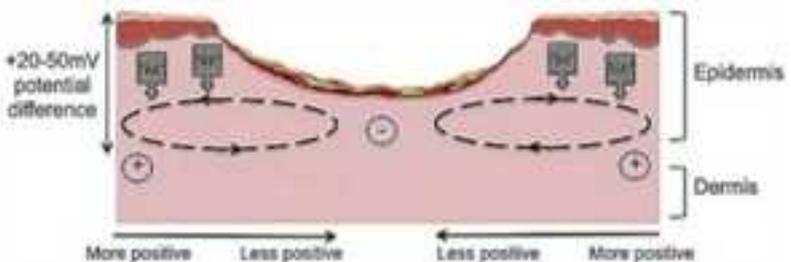


Figure 4. ATPase pumps in wound healing (Din & Bayat, 2014).

It's important to consider the stimulation amplitudes and their physiological sensations, as described in Table 1.

Successful skin wound healing relies on the migration of three key types of skin cells: keratinocytes, fibroblasts, and endothelial cells. Table 2 shows some electrostimulation parameters based on the type of lesion.

Table 1. Comparison of Amplitudes

Amplitude (mA)	Type of stimulation	Sensation
300-400 mA	Electrical muscle stimulation	Muscle contraction
150-200 mA	Transepidermal nerve stimulation	Tingling or itching
Less than 100 mA	Subsensory	Not felt
Under 60 mA	Microcurrent stimulation	X

Electrostimulation applied to different types of wounds in order to compare the different voltages applied for wound healing.

Wound Type	Type of Current/Voltage Applied	Healing Time	Referencia
Diabetic, Arterial, and Venous Ulcers	TENS current (150-250 mA, phase duration of 1.0-0.2 msec, frequency of 80 Hz)	Treatment duration: 20-30 minutes (max. 60 minutes), repeated twice daily at 6-hour intervals	(Company, s.f)
Ischemic Wounds	Low-Intensity Direct Current (LIDC) 200-800 microamps	3 sessions of 2 hours per day. Total duration: 9.6 weeks	(Balakatounis, 2008)
Secondary Cutaneous Wound	High-Voltage Pulsed Current (150-500 V).	Pulse frequency of 80 to 120 Hz with negative polarity, a pulse duration of 40 to 100 μ s, and a treatment period of 25 minutes per session	(Zamora et al, 2022)
Chronic ulcers	Dose range 250-500 μ C/s	5 weeks	(Kloth, 2013)

Methods

3. Design of the Electro-stimulator and Experimental Setup

The prototype circuit for electrical stimulation in wound healing (Diagram 1) is mainly composed of an Arduino UNO microcontroller, which is responsible for generating the digital control signals and supplying 5V to activate the transistor. A TIP120 NPN transistor acts as an electronic switch to control the current flow from an external 9V source to the electrodes

(patches in contact with the wound). A 10:1 transformer raises the voltage to simulate a higher-amplitude alternating current signal. Figure 6 shows the implemented circuit for the electrical stimulation.

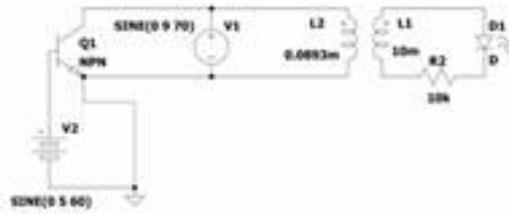


Diagram 1. Electrostimulator circuit. This diagram shows the components used, where V1 is the 9V power source, V2 is the 5V supplied by the Arduino, Q1 is the TIP120 transistor, L1 and L2 are the transformer, R2 is the resistor, and D1 represents the electrodes or the voltage output.



Figure 6. Final assembly of the electrostimulator prototype.

3.1 Code to control Arduino UNO

The code used (Figure 7) allows for control of the duty cycle via the line `int duty = 80;`. This enables the frequency and intensity of the pulses to be managed using Pulse Width Modulation (PWM), which controls the amount of energy by varying the pulse width of the signal.

```

1 // Arduino code for controlling the electrostimulator
2
3 #include <Arduino.h>
4
5 // Pin definitions
6 const int pinLed = 13; // LED pin
7 const int pinTrans = 9; // Transistor pin
8
9 // Variables
10 int duty = 80; // Duty cycle percentage
11
12 // Setup function
13 void setup() {
14   pinMode(pinLed, OUTPUT);
15   pinMode(pinTrans, OUTPUT);
16 }
17
18 // Loop function
19 void loop() {
20   digitalWrite(pinLed, HIGH);
21   digitalWrite(pinTrans, HIGH);
22   delay(1000); // Delay 1 second
23   digitalWrite(pinLed, LOW);
24   digitalWrite(pinTrans, LOW);
25   delay(1000); // Delay 1 second
26 }

```

Figure 7. Code for controlling the Arduino.

3.2 Waveform

The type of current used for microcurrent electrostimulation was pulsed monophasic current at low intensities (3-6 mA). The waveforms in Figures 8 and 9 correspond to this type of current.

This specific current was chosen because it is the most frequently used type for stimulating tissue healing. Furthermore, according to Feedar et al. (1991), it has been shown to increase wound closure and healing by 14%, compared to 8.25% in a control group.



Figures 8 and 9. The waveform of the pulses measured at the Arduino's output (left image) and the waveform of the pulses measured at the transformer's output with a 10% duty cycle (right image).

3.3 Electrical parameters used

Table 3. Proposed Protocol.

Type of current	Microcurrents
Waveform	Monophasic
Intensity	3-6 mA
Frequency	60 Hz
electric field	100 mV/mm
Session time	20 minutes
Treatment time	9 days

Results

As part of our research results on electrostimulation in wound healing, two linear incisions were made using a sterile scalpel on the bicep region of the right and left arms of a 21-year-old female in good health. The wound on the right arm, measuring 2.1 mm in length and 2 mm in depth, was treated with electrostimulation, while the wound on the left arm, with a length of 2 mm and a depth of 1 mm, served as the control group without intervention (Table 4).

From the first day post-incision, significant differences were observed in the hemostasis process between both wounds. The electrostimulation-treated wound exhibited denser and more controlled bleeding, suggesting a more efficient activation of coagulation mechanisms.

Furthermore, the microcurrent-treated wound displayed more regulated electrotaxis and a significantly milder inflammatory response, indicating a more effective and organized cellular migration. As the days progressed, the treated wound showed a cleaner recovery, characterized by well-defined edges and a considerable reduction in redness, in contrast to the control wound, which exhibited a less efficient closure.

By the ninth day of follow-up, both wounds had completely closed. However, the treated wound showed aesthetically superior healing, which suggests a better initial response in hemostasis, a more efficient electrotaxis, and a more organized subsequent tissue regeneration.



Figure 11. Application of electrostimulation to the test subject.

Table 4. Results of microcurrent electrostimulation, with 2.2 V applied for 20 minutes daily over nine days.

Day	With treatment	Without treatment
1		
3		
9		

Conclusion

These preliminary findings support the hypothesis that electrostimulation improves healing by promoting perfusion, cell migration, and inflammatory modulation. However, individual factors must be considered, and it should be used as part of a comprehensive approach.

Acknowledgments

To the faculty, advisors, and family for their support throughout the completion of this project.

Referencias

- Balakatounis, K. C., & Angoules, A. G. (2008). Low-intensity Electrical Stimulation in Wound Healing: Review of the Efficacy of Externally Applied Currents Resembling the Current of Injury. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2396465/>
- Company José, C., González, M., & Claramunt, J. C. (s.f). Electroterapia en la curación de heridas. <https://www.enfervalencia.org/ei/anteriores/articulos/rev54/artic09.htm3>
- Feedar JA, Kloth LC, Gentzkow GD. Cicatrización de úlceras dérmicas crónicas mejorada con estimulación eléctrica pulsada monofásica. *Phys Ther.* septiembre de 1991; 71(9):639-49. doi: 10.1093/ptj/71.9.639. PMID: 1881954.
- Flores, M.V., Flores, J., & Domínguez, Ma. V. (2023). Heridas crónicas: retos y tratamientos. *Revista Digital Universitaria*, 24(5). <http://doi.org/10.22201/cuaieed.16076079e.2023.24.5.4>
- Greaves, N. S., Iqbal, S. A., Baguneid, M., & Bayat, A. (2013). The role of skin substitutes in the management of chronic cutaneous wounds. *Wound Repair and Regeneration*, 30, 194-210. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23437811/>
- Guarín, C., Quiroga, P., & Landínez, N. S. (n.d.). Proceso de Cicatrización de heridas de piel, campos endógenos y su relación con las heridas crónicas. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-00112013000400014&script=sci_arttext
- Hernández, E., Muñoz, C., Cote Estrada, L., Corona, C., Mendoza, E., Ramos, I., López Leal, J., Arroyo, F., Barrera, M., & Ramos Terrazas, V. (2023). Horizontes del Conocimiento. *Aesculap Seguridad del Paciente*. <https://www.aesculap-seguridaddelpaciente.org.mx/docs/revista/2023/Abril.pdf>
- Kloth, L. C. (2013). Electrical stimulation technologies for wound healing. *Advances in Wound Care*, 3(2), 81-90. <https://doi.org/10.1089/wound.2013.0459>

- McGinnis, M. E., & Venable, J. W., Jr (1986). Voltage gradients in new limb stumps. *Progress in clinical and biological research*, 210, 231–238. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/3960912/>
- Porras, E., Rubio, E., Ortiz, E., Moreno, K. & Chairez, I. (2018). Sistema de galvanotaxis para migración celular en medio de cultivo semisólido: Evaluación por métodos de procesamiento de imágenes (Parte 2). *Sociedad Mexicana de ingeniería biomédica*, pp 158-161. [Dx.doi.org/10.24254/CNIB.18.23](https://doi.org/10.24254/CNIB.18.23)
- Preetam, S., Ghosh, A., Mishra, R., Pandey, A., Roy, D. S., Rustagi, S., & Malik, S. (2024). Electrical stimulation: a novel therapeutic strategy to heal biological wounds. <https://doi.org/10.1039/d4ra04258a>
- Quiroga, P. A., Guarín, C., Forero, M., & Landínez, N. S. (s. f.). Propuesta de un protocolo de electroestimulación para el tratamiento de úlceras por presión grado II y III. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-00112013000400013
- Senet, P. (2016). *Fisiología de la cicatrización cutánea*. Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S1761-2896\(08\)70356-X](https://doi.org/10.1016/S1761-2896(08)70356-X)
- Valverde, A. R. (2016). Cicatrizacion. Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7070359>
- Wilkinson, H. N., & Hardman, M. J. (2020). Wound healing: cellular mechanisms and pathological outcomes. *Open Biology*, 10(9). <https://doi.org/10.1098/rsob.200223>
- Wound Healing Society. (2025). The Wound Healing Society. <https://woundheal.org/>

DESARROLLO DE UN ELECTRODO PARA LA DETECCIÓN DE LACTATO ANTES Y DURANTE EL ESFUERZO FÍSICO

ELECTRODE FOR THE DETECTION OF LACTATE BEFORE AND DURING PHYSICAL EFFORT

Gabriel Gallardo (1)
Anahí Garrido (2)
Ximena Hernández (3)
Fernanda Martínez (4)
Liliana Martínez (5)
Yolanda Mirón (6)
Raúl Morgan (7)
Gabriel Ramos (8)
Dr. Joaquín Alvarado (9)

Licenciatura en biotecnología FCB BUAP

Correos:

gabriel.gallardo@alumno.buap.mx
gz202335959@alm.buap.mx
hm202336692@alm.buap.mx
mm202347166@alm.buap.mx
liliana.martinez@alumno.buap.mx
ml202348074@alm.buap.mx
mh202348758@alm.buap.mx
rm202352541@alm.buap.mx
joaquin.alvarado@correo.buap.mx

<https://orcid.org/0009-0004-0152-1737>
<https://orcid.org/0009-0005-8352-1614>
<https://orcid.org/0009-0008-2896-7551>
<https://orcid.org/0009-0000-5393-8455>
<https://orcid.org/0009-0004-6159-2844>
<https://orcid.org/0009-0009-1634-6878>
<https://orcid.org/0009-0003-6476-5969>
<https://orcid.org/0009-0000-7841-6717>

Folio: A11N115.29/1023

Resumen

Basado en un proyecto de investigación en biofísica en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), se realizó un estudio con el objetivo de desarrollar una técnica electroquímica simple y de bajo costo para la detección de lactato en saliva. El lactato es un metabolito clave producido durante el metabolismo anaerobio de la glucosa, y su acumulación es un indicador ampliamente reconocido de la fatiga muscular durante el esfuerzo físico. La metodología propuesta consiste en inmovilizar la enzima Lactato Deshidrogenasa (LDH) sobre un electrodo, utilizando materiales como nanopartículas y sílice mesoporoosa. La reacción enzimática se mide electroquímicamente mediante un Analizador de Parámetros de Dispositivos Semiconductores, que detecta la corriente generada a partir de la oxidación del lactato. Este enfoque busca proporcionar una alternativa accesible y eficiente frente a métodos más complejos y costosos como la RMN para el monitoreo de umbrales de lactato.

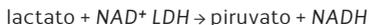
Palabras clave: Lactato; Electrodo; Esfuerzo físico; NADH.

Abstract

Lactate is a byproduct of glucose metabolism, generated when cells produce energy in the absence of sufficient oxygen. It is also key in physical activity, as its accumulation is linked to muscle fatigue. There are several methods for measuring lactate, one of which is in the presence of saliva. Therefore, in this project, we will develop a technique to detect it using enzyme immobilization and electrochemical measurements, following a procedure from attaching an electrode to obtaining the results of salivary lactate measurements.

Lactato y su relación con el esfuerzo físico

El metabolismo energético humano depende principalmente de la vía aeróbica; sin embargo, durante actividad física intensa y sostenida se activa la vía anaeróbica, en la cual la lactato deshidrogenasa (LDH) cataliza la conversión reversible de lactato a piruvato.



Este proceso ocurre principalmente en glóbulos rojos, médula espinal, cerebro y músculo esquelético. En condiciones normales, la concentración de lactato en sangre oscila entre 0.5-1.5 mmol/L, manteniéndose estable gracias a la depuración realizada por hígado y riñones. No obstante, durante esfuerzos elevados se alcanza el umbral de lactato, punto en el que la producción supera la capacidad de eliminación, lo que provoca su acumulación y se asocia con la aparición de fatiga muscular.

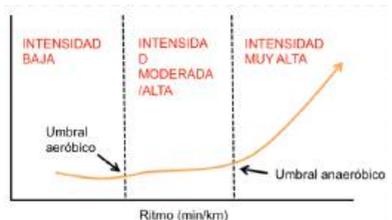


Figura 1. Relación de la concentración de lactato con la intensidad del ejercicio realizado.
<https://franruiz.neocities.org/OCR/tips>

La detección de lactato es fundamental en medicina y deporte, por lo que proponemos un biosensor basado en lactato deshidrogenasa (LDH) y nanopartículas metálicas con sílice mesoporosa, que permite cuantificarlo mediante la conversión de lactato a piruvato y la generación proporcional de NADH. Este sistema ofrece ventajas frente a métodos tradicionales como quimioluminiscencia o pruebas colorimétricas, al ser más económico, portátil, rápido y con alta selectividad en matrices complejas como la saliva.

Diseño del biosensor

Un biosensor funciona como un “detector biológico” que reconoce una sustancia específica y transforma esa reacción en una señal eléctrica medible. Está formado por:

- Biorreceptor: identifica la molécula de interés (en este caso, lactato)
- Transductor: convierte la reacción biológica en una señal eléctrica.

En este trabajo se desarrolló un biosensor electroquímico, que mide cambios en corriente o voltaje generados por reacciones enzimáticas. Para ello se emplea un sistema de tres electrodos:

- Electrodo de trabajo (WE): contiene el biorreceptor.
- Electrodo de referencia (RE): mantiene estable y confiable la medición.
- Contraelectrodo (CE): permite que circule la corriente.

La enzima usada fue LDH seleccionada por su alta especificidad y porque convierte lactato en piruvato sin requerir oxígeno. En cuanto a materiales, se utilizó PET-ITO (plástico flexible recubierto con una capa conductora de óxido de indio y estaño), ideal para sensores portátiles y de bajo costo. Los electrodos se imprimieron con tinta de plata, que ofrece buena conductividad y bajo precio. Para mejorar el desempeño, el electrodo de trabajo se modificó con nanomateriales:

- Óxido de zinc (ZnO), que facilita la transferencia de electrones.
- Sílice mesoporosa ($m\text{SiO}_2$), que proporciona una superficie porosa para fijar mejor las enzimas.

Gracias a estas optimizaciones, el sensor logra mayor sensibilidad.

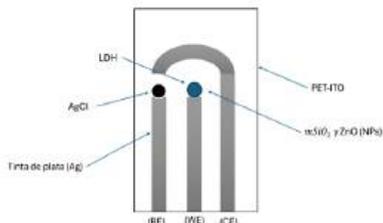


Figura 2. Diagrama representativo del biosensor de lactato y el sistema de 3 electrodos. Diagrama elaborado por el autor.

Elaboración del biosensor

1. El biosensor se construyó utilizando pequeñas placas de PET-ITO, un material plástico flexible recubierto con una capa conductora. Tras limpiarlas, se diseñó y recortó la forma de los electrodos con ayuda de plantillas y cinta especial. Posteriormente, se aplicó pintura de plata para formar las pistas conductoras y se fijó mediante calentamiento.
2. Para los electrodos de referencia se añadieron compuestos de plata y cloro, y se prepararon distintas variantes del electrodo de trabajo: algunos con nanopartículas de ZnO y sílice mesoporosa ($mSiO_2$), y otros solo con $mSiO_2$. Sobre el electrodo de trabajo se inmovilizó la enzima LDH capaz de reaccionar específicamente con el lactato.
3. Enseguida se incorporó una solución con el cofactor NADH y, finalmente, los electrodos se conectaron a un potenciostato, un instrumento que mide corrientes eléctricas muy pequeñas. Primero se probaron con NADH puro y después con muestras de saliva, comprobando así la capacidad del biosensor para detectar lactato en condiciones reales.



Figura 3. Conexión de los electrodos analizador. Imagen elaborada por el autor.

Se obtuvieron muestras de saliva de una mujer de 20 años (1.60 m, 70 kg) en condiciones controladas (27 °C, hidratación normal). La participante enjuagó su boca 15 minutos antes de la recolección. Se tomaron dos muestras de 1.5 mL en microtubos de polipropileno, una en reposo y otra tras el esfuerzo físico, junto con el registro de la frecuencia cardíaca.

La prueba de esfuerzo consistió en caminar 1 km a ~5 m/s sobre una pendiente de 40°. La muestra en reposo se tomó con una frecuencia cardíaca de 107 lpm, y la muestra post-esfuerzo se recolectó inmediatamente después, con una frecuencia de 182 lpm.

Reducción de NADH a NAD⁺

Para evaluar la presencia de lactato en muestras salivales, se implementaron ambos tipos de electrodos fabricados (con $mSiO_2$ -ZnO en los electrodos #1 y #2 y con solo $mSiO_2$ en los electrodos #3 y #4) para reducir el NADH depositado en cada electrodo a NAD⁺. Esto se realizó en una medición inicial con el Analizador de Parámetros de Dispositivos Semiconductores Keysight B1500A, aplicando una medición A-V (corriente-voltaje) a 1 V hasta observar una trayectoria satisfactoria de aumento de corriente en el gráfico de salida del sistema (Figura 4). Este proceso se repite con el resto de los electrodos.

Actividad del electrodo de $mSiO_2-ZnO$

Una vez realizada la oxidación de NADH en cada electrodo, fue colocada una muestra salival previa al esfuerzo físico en el electrodo de $mSiO_2-ZnO$. En este se realizaron 3 ciclos de medición con el KEYSIGHT B1500A (Figura 5), donde se observa cómo durante la primera medición se presenta un aumento en la corriente hasta 42 mA en comparación con su previa oxidación (Figura 4); en las mediciones 2 y 3, la trayectoria se muestra diferente, esto al transformar más lactato presente en la muestra. Por otro lado, la muestra salival recolectada durante el esfuerzo físico debería mostrar niveles más altos en la corriente durante las mediciones

(Figura 6); sin embargo, una vez completada la ruta, la corriente es menor en cada uno de los ciclos.

Con la muestra salival previa al esfuerzo en el electrodo de $mSiO_2$, se muestra una corriente máxima de 25 mA (Figura 7). En el caso del electrodo con $mSiO_2$ y la muestra salival durante el ejercicio (Figura 8), muestra una vaga diferencia al comportamiento del gráfico anterior (Figura 7); debido a un aumento similar a una línea recta, debido a esto fue difícil determinar con claridad el punto donde ocurre la oxidación.

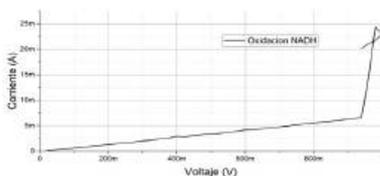


Figura 4. Oxidación de NADH a NAD^+ en el electrodo #1 de $mSiO_2-ZnO$ sin saliva en medición de A-V. Gráfico de elaboración propia.

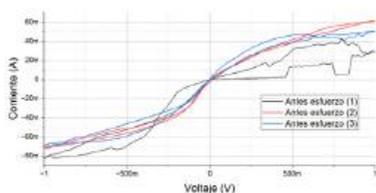


Figura 5. Actividad del electrodo #1 de $mSiO_2-ZnO$, incorporado con muestra salival previo al esfuerzo físico. Gráfico de elaboración propia.

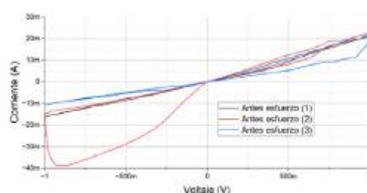


Figura 7. Actividad del electrodo #3 de $mSiO_2$, incorporado con muestra salival previa al esfuerzo físico. Gráfico de elaboración propia.

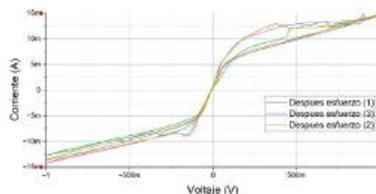


Figura 6. Actividad del electrodo #2 de $mSiO_2-ZnO$, incorporado con muestra salival durante el esfuerzo físico. Gráfico de elaboración propia.

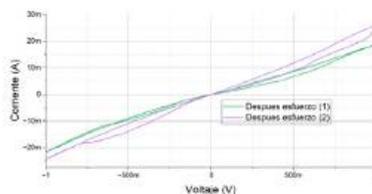


Figura 8. Actividad del electrodo #4 de $mSiO_2$, incorporado con muestra salival durante el esfuerzo físico. Gráfico de elaboración propia.

Conclusiones

El conocimiento de los niveles de lactato salival durante o después del esfuerzo físico nos permite saber que estos son proporcionales a la corriente medida. Por lo tanto, una medición más baja indica una menor presencia de lactato, como se observa en las gráficas.

La incorporación de nanopartículas de ZnO junto con mSiO₂ incrementa la señal frente al uso exclusivo de mSiO₂, lo que nos permite diseñar electrodos más selectivos y fáciles de construir, útiles tanto en el monitoreo durante ejercicio como tal vez en el diagnóstico clínico.

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.

Conflicto de interés

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

Agradecimientos

Al docente y asesores por el apoyo brindado durante la formación académica de este curso.

Referencias

- Castro-Ortiz LP, Luna Pabello VM, Villalobos Pietrini R. State of the art and perspectives of the use of environmental biosensors in Mexico. *Int J Environ Pollut*. 2007;23(1):35-45.
- Cocuzza C, Antoniono E, Ottone C, Cauda V, Fino D, Piumetti M. Preparation of a mesoporous biosensor for human lactate dehydrogenase for potential anticancer inhibitor screening. *ACS Biomater Sci Eng*. 2023;9(11):6045-57. Doi:10.1021/acsbio.3c00582.
- Daniel B. What is lactate and how does it affect our athletic performance? *Onalabs*. 2021 Sep 17 [cited 2025 Sep 8]. Available from: <https://onalabs.com/2021/09/17/what-is-lactate-and-how-does-it-influence-our-sports-performance/>
- Ding Y, Yang L, Wen J, Ma Y, Dai G, Mo F, Wang J. A comprehensive review of advanced lactate biosensor materials, methods, and applications in modern healthcare. *Sensors (Basel)*. 2025;25(4):1045. Doi:10.3390/s25041045.
- García-Guzmán JJ, Sierra-Padilla A, Palacios-Santander JM, Fernández-Alba JJ, Macías CG, Cubillana-Aguilera L. What is left for real-life lactate monitoring? Current advances in electrochemical lactate (bio)sensors for agri-food and biomedical applications. *Biosensors (Basel)*. 2022;12(11):919. Doi:10.3390/bios12110919.
- Higgins C. Lactate and lactic acidosis. *Acutecaretesting*. 2007 Oct [cited 2025 Sep 8]. Available from: <https://acutecaretesting.org/en/articles/lactate-and-lactic-acidosis/>
- İnce B, Sezgintürk MK. A high sensitive and cost-effective disposable biosensor for adiponectin determination in real human serum samples. *Sens Actuators B Chem*. 2020;328:129051. Doi:10.1016/j.snb.2020.129051.
- Istrate O-M, Rotariu L, Bala C. Amperometric L-lactate biosensor based upon a gold nanoparticles/reduced graphene oxide/poly(allylamine hydrochloride) modified screen-printed graphite electrode. *Chemosensors*. 2021;9(4):74. Doi:10.3390/chemosensors9040074.

Kumar S, Kumar S, Ali MA, Anand P, Agrawal VV, John R, Malhotra BD. Lactose biosensor based on lactate oxidase immobilized onto graphene oxide nanoparticles. *J Biotechnol.* 2018;281:49-56.

Lanzalaco S, Molina BG. Polymers and plastics modified electrodes for biosensors: a review. *Molecules.* 2020;25(10):2446. Doi:10.3390/molecules25102446.

Li H, Liu X, Li L, Mu X, Genov R, Mason AJ. CMOS electrochemical instrumentation for biosensor microsystems: a review. *Sensors (Basel).* 2017;17(1):74. Doi:10.3390/s17010074.

Maafa IM. Potential of zinc oxide nanostructures in biosensor applications. *Biosensors (Basel).* 2025;15(1):61. Doi:10.3390/bios15010061.

Martínez DL, Borsani JMC, Carrasco CR. Oxygen saturation and lactate testing in cyclists. *MLS Sport Res.* 2021;1(2). Doi:10.54716/mlssr.v1i2.673.

Nesakumar N, Thandavan K, Sethuraman S, Krishnan UM, Rayappan JBB. An electrochemical biosensor with nanointerface for lactate detection based on lactate dehydrogenase immobilized on zinc oxide nanorods. *J Colloid Interface Sci.* 2013;414:90-6. Doi:10.1016/j.jcis.2013.09.052.

Pathiyil V, D'Cruz AM. Salivary lactate dehydrogenase as a prognostic marker in oral squamous cell carcinoma patients following surgical therapy. *J Exp Oncol.* 2017;11(2):133-7.

Pietricola G, Tommasi T, Dosa M, Camelin E, Berruto E, Ottone C, et al. Synthesis and characterization of ordered mesoporous silicas for the immobilization of formate dehydrogenase (FDH). *Int J Biol Macromol.* 2021;177:261-70. Doi:10.1016/j.ijbiomac.2021.02.114.

Renedo OD, Alonso-Lomillo M, Martínez MA. Recent developments in the field of screen-printed electrodes and their related applications. *Talanta.* 2007;73(2):202-19. Doi:10.1016/j.talanta.2007.03.050.

- Santamaria J, Caicedo C. Determination of the lactate threshold during training. National University of Chimborazo. Riobamba, Ecuador; 2023 [cited 2025 Sep 8]. Available from: <http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/11377/1/UNACH-EC-FCEHT-PAFD-0028-2023.pdf>
- Shen Y, Liu C, He H, Zhang M, Wang H, Ji K, et al. Recent advances in wearable biosensors for non-invasive detection of human lactate. *Biosensors (Basel)*. 2022;12(12):1164. Doi:10.3390/bios12121164.
- Srinivasan B, Muthukumar S, Prasad S. Smartphone-based portable biosensor for salivary lactate detection. *Sens Actuators B Chem*. 2017;246:894-900. Doi:10.1016/j.snb.2016.12.086.
- Veracruz University. High-performance liquid chromatography (HPLC). [cited 2025 Sep 8]. Available from: <https://www.ultravioleta.mx/sara/equipamiento/hplc/3>
- Velasco-Garcia MN, Mottram T. Biosensor technology addressing agricultural problems. *Biosyst Eng*. 2003;84(1):1-12. Doi:10.1016/s1537-5110(02)00236-2.

DISPOSITIVOS DE DETECCIÓN DE ESTRÉS BASADOS EN SEÑALES ÓPTICAS Y MONITORIZACIÓN DEL SUDOR

STRESS DETECTION DEVICES BASED ON OPTICAL SIGNALS
AND SWEAT MONITORING

Carlos F. Contreras-Bautista* (1)
Valentina I. Quiros-Chazari (2)
Raphael E. Huerta-Aragón (3)
Eleazar Martínez-Cano (4)
Mariana Morales-Castillo (5)
Cristian A. Martínez-Zendejas (6)
J. Alvarado (7).

Correos:

cb202343032@alm.buap.mx
qc202351740@alm.buap.mx
ha202336945@alm.buap.mx
mc202338696@alm.buap.mx
mc202348372@alm.buap.mx
mz202347386@alm.buap.mx
joaquin.alvarado@correo.buap.mx

<https://orcid.org/0009-0001-7850-1724>
<https://orcid.org/0009-0003-8509-1588>
<https://orcid.org/0009-0005-7129-8726>
<https://orcid.org/0009-0002-0190-0185>
<https://orcid.org/0009-0007-3838-4256>
<https://orcid.org/0009-0003-2735-2161>
<https://orcid.org/0000-0001-7186-4429>

Folio: A11N1188.32/1031

Resumen

El estrés crónico afecta negativamente la salud física y mental, y su detección temprana es esencial para prevenir varios trastornos y enfermedades. Debido a esto surge la necesidad de herramientas innovadoras para el monitoreo continuo del estrés. Este proyecto propone el desarrollo de un dispositivo que combina sensores ópticos de frecuencia cardíaca con un sensor electroquímico para la detección de cambios en la composición del sudor, usando las catecolaminas como indicadores debido a su papel como señales en la activación fisiológica relacionada con el estrés. El sensor usa materiales como Poli(3,4-etilendioxitiofeno)-poli (estireno sulfonato) sobre una base de tereftalato de polietileno con óxido de indio y estaño para detectar reacciones de óxido-reducción. El sensor de frecuencia cardíaca se basa en Arduino y sensores infrarrojos para obtener lecturas en tiempo real. Los resultados iniciales sugieren que estos parámetros se pueden complementar para obtener una medición del estrés fisiológico. Dado esto, este proyecto surge como una alternativa para el monitoreo de la salud mental, haciendo posible la prevención de trastornos asociados al estrés.

Palabras clave: Estrés; biosensores; monitoreo del sudor; cortisol en sudor; análisis no invasivo; dispositivos portátiles; ansiedad; procesamiento de señales biológicas, catecolaminas.

Abstract

Chronic stress negatively affects physical and mental health; its early detection is essential to prevent various disorders and diseases. This creates a need for innovative tools for continuous stress monitoring. This project proposes the development of a device that combines optical heart rate sensors with an electrochemical sensor to detect changes in sweat composition, using catecholamines as indicators due to their role as signals in stress-related physiological activation. The sensor uses materials such as Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-poly (styrene sulfonate) on a polyethylene terephthalate base with indium tin oxide to detect oxide-reduction reactions. The heart rate sensor uses Arduino and infrared sensors to obtain real-time readings. Initial results suggest that these parameters can be combined to obtain a measurement of physiological stress. Given this, this project emerges as an alternative for mental health monitoring, making it possible to prevent stress-associated disorders.

Keywords: Stress; biosensors; sweat monitoring; sweat cortisol; non-invasive analysis; wearable devices; anxiety; biological signal processing; catecholamines.

Introducción

Los trastornos de ansiedad son un problema de salud mental común que afecta a millones de personas en todo el mundo, incluyendo México. Según la OMS, en 2019, 301 millones de personas padecían trastornos de ansiedad. Actualmente se calcula que alrededor del 4% de la población mundial padece algún trastorno de ansiedad. Las personas con trastornos de ansiedad experimentan miedo y preocupación intensa y excesiva, acompañados de síntomas físicos, conductuales y cognitivos [1].

Aproximadamente solo el 27,6% de las personas que necesitan tratamiento para trastornos mentales lo reciben. Los obstáculos incluyen la falta de conciencia sobre la tratabilidad de estos problemas, la insuficiente inversión en servicios de salud mental, la escasez de personal de salud capacitados y el estigma social [1].

La frecuencia cardíaca y la respuesta electrodérmica son parámetros fisiológicos relacionados con el estrés y la ansiedad. La frecuencia cardíaca es un indicador común de estrés y ansiedad, ya que aumenta en respuesta a estímulos estresantes.

Las catecolaminas (dopamina, adrenalina y noradrenalina) son un grupo de hormonas que preparan el cuerpo para la respuesta al estrés, elevando la frecuencia cardíaca, la presión arterial e induciendo un estado de alerta. Están presentes en el sudor humano y se pueden medir para rastrear los cambios en su concentra-

ción, proporcionándonos información clave estrictamente relacionada con la respuesta al estrés, por esta razón, las catecolaminas son consideradas potentes biomarcadores del estrés, esto abre la puerta a la creación de un sensor capaz de medir los cambios en la concentración de estas moléculas [2].

Para medir estas moléculas, podemos utilizar la detección electroquímica. Esta técnica rastrea el cambio en las señales eléctricas para detectar compuestos activos. Más concretamente, mide la corriente eléctrica producida por la oxidación o reducción de un analito en la superficie de un electrodo [3]. Esto es ideal para apuntar catecolaminas. El potencial de oxidación para noradrenalina y adrenalina está entre +0,6 V y +0,8 V. Aplicando un voltaje en este rango específico, el sensor puede oxidar selectivamente las moléculas minimizando la interferencia con otras sustancias en el sudor. En este proceso, una especie química pierde un electrón (oxidación) y genera una señal eléctrica medible directamente relacionada con la concentración del analito [4].

Sin embargo, la sensibilidad del sensor es un factor crítico, debido a que las catecolaminas pueden estar presentes en concentraciones muy bajas en el sudor, un sensor debe tener una alta relación señal-ruido. Esto le permite medir con precisión cambios incluso leves en los niveles de catecolaminas, por lo que es una característica esencial para una herramienta eficaz y precisa de monitoreo del estrés [2].

Desarrollo

Composición estructural de los dispositivos diseñados para el monitoreo de la sudoración

Se diseñaron dos prototipos experimentales (Figura 1). El dispositivo A está conformado por un sustrato de tereftalato de polietileno recubierto con óxido de indio y estaño (PET-ITO), sobre el cual se integraron tres electrodos de tinta de plata,

configurados como contraelectrodo, electrodo de trabajo y electrodo de referencia. Las capas de detección consisten en PEDOT:PSS dopado con dimetilsulfóxido (DMSO), depositado sobre el electrodo de trabajo, y un sistema de nitrato de plata-cloruro de sodio ($\text{AgNO}_3\text{-NaCl}$)

aplicado al electrodo de referencia. El dispositivo B presenta una estructura similar a la del dispositivo A; sin embargo, incorpora nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) inmovilizadas en una matriz de sílice

mesoporosa, ambas sintetizadas en el Laboratorio de Aplicaciones Tecnológicas de Semiconductores. Este compuesto se depositó sobre el electrodo de trabajo.

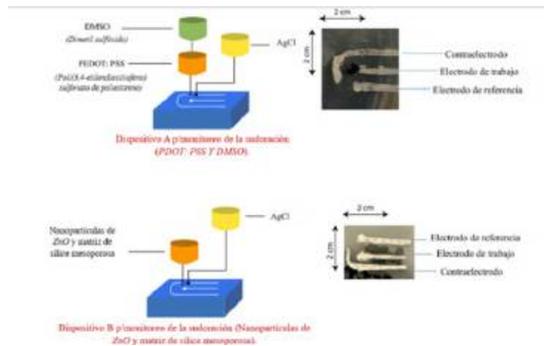


Figura 1. Composición estructural e Interacciones moleculares entre los componentes. Fuente: propia

PEDOT: PSS

El poli(3,4-etilendioxilgialiteno):polisulfonato de estireno, es un material ampliamente investigado por sus propiedades semiconductoras debido a su alto rango de conductividad eléctrica. Este valor depende de las condiciones de síntesis, procesamiento de aditivos o postratamiento [5]. Tanto el postratamiento como la incorporación de diversos aditivos se han utilizado como una forma eficaz y fácil de mejorar su rendimiento en diversas aplicaciones [6].

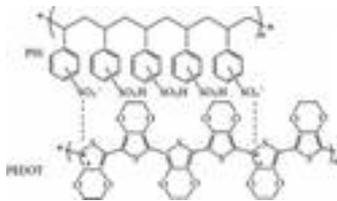


Figura 2. Estructura química del PEDOT:PSS. Fuente: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2020.109726>.

Existen muchos casos de recién nacidos que no son lactados con seno materno y necesariamente se recurre al uso del biberón como una forma de ingesta que no reúne todas las ventajas de la alimentación que la naturaleza diseñó para los mamíferos.

El uso malentendido del biberón es generado por la aprensión de las madres modernas, que evitan por cualquier medio que el bebé lllore. Así la madre reacciona ante manifestaciones de cualquier incomodidad, como una forma de demandar alimento, lo que tiene como resultado un patrón de aprendizaje temprano en el cual se asocia la gratificación oral cuando se enfrenta a cualquier problema de la vida. El ser humano es un mamífero que, al nacer, tiene como primer reflejo la orientación que permite al recién nacido a encontrar el pezón de su mamá. El acto de mamar requiere un alto grado de complejidad, experiencia y entrenamiento.

El grupo sulfonato de PSS (SO_3^-) estabiliza la carga positiva de los polarones presentes en la cadena PEDOT (Figura 3a) [8]. El movimiento de estos polarones a lo largo de la cadena le confiere al PEDOT su capacidad semiconductora. Sin embargo,

esta capacidad depende también del porcentaje del contenido de PSS.

Con el aumento del contenido de PSS, la conductividad disminuye [9] debido a su comportamiento aislante.

Para mejorar la conductividad de PEDOT:PSS, en este estudio se optó por emplear

dimetilsulfóxido (DMSO) como cosolvente en bajas concentraciones. La alta constante dieléctrica del DMSO reduce las fuerzas electrostáticas que unen a las cadenas PEDOT y PSS. Al reducir esta interacción, el PSS se elimina parcialmente y se reorganiza estructuralmente, lo que permite que las cadenas PEDOT se acoplen de una manera más eficiente, permitiendo un mejor transporte de cargas a través del establecimiento de redes estructurales más continuas (Figura 3b). [10]

Mahato et al, (2020) determinaron que una concentración cercana al 5% de DMSO es la más óptima ya que se induce un cambio conformacional de un tipo esférico a un tipo elipsoidal en los bloques PEDOT:PSS (Figura 4b), que establecen probablemente, sea la estructura óptima para aumentar la conductividad eléctrica.

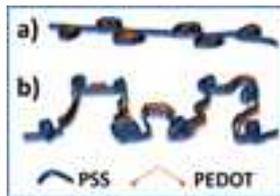


Figura 3. Representación esquemática de la interacción entre PEDOT, PSS y DMSO. Fuente: https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0014305720302433-gr5_lrg.jpg.

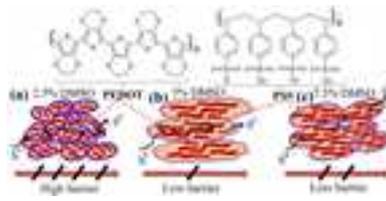


Figura 4. Modelos morfológicos esquemáticos de PEDOT:PSS (dopado con 2,5, 5 y 7,5% de DMSO) Fuente: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.143967>

Matriz de sílice mesoporosa y nano partículas de ZnO

Para mejorar el rendimiento de la interfaz entre el electrodo y el analito se optó por utilizar un compuesto a base de nanopartículas de ZnO dispersas sobre una superficie de matriz de sílice mesoporosa, es bien sabido que las nanopartículas de ZnO tienden a agregarse espontáneamente en solución, esta característica limita las interacciones que el compuesto puede

hacer con el analito al reducir el área superficial. Este fenómeno representa un problema al tratar de hacer un sensor de alta sensibilidad como el planteado en este estudio. Por lo tanto, la dispersión a lo largo de la matriz de sílice mesoporosa fue indispensable para permitir una mejor interacción entre los compuestos.

Dispositivo de Frecuencia cardiaca

Un sensor infrarrojo opera emitiendo y detectando un haz de luz cercano al infrarrojo; las variaciones en la intensidad recibida, causadas por el flujo sanguíneo en la muñeca, permiten registrar el pulso. Para la adquisición se empleó una placa Arduino UNO programada para mostrar lecturas en una pantalla LCD y guardar los datos en una tarjeta SD en dos archivos .csv: uno con los valores procesados (BPM) y otro con las lecturas analógicas crudas.

En cuanto a la implementación y procesamiento, el cálculo de BPM se obtiene a partir del tiempo transcurrido entre picos detectados en la señal analógica (detección de intervalo entre latidos). El código está organizado en `setup()` y `loop()`, incluye rutinas para verificar/crear archivos .csv y evita la sobrescritura al iniciar nuevas sesiones, lo que facilita el análisis posterior y la trazabilidad de los datos.

Ventajas	Desventajas
<p>Almacenamiento de datos e interfaz:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Usa una tarjeta SD para guardar datos tanto procesados (BPM) como crudos (valores analógicos), lo que permite análisis posteriores y respaldo. • La pantalla LCD proporciona una retroalimentación inmediata al usuario sin depender de un monitor serial. 	<p>Hardware: Problemas de contacto (falsos positivos):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Falso contacto entre el sensor infrarrojo, la LCD y la placa Arduino deriva en saltos irregulares en BPM, compromete la confiabilidad de la lectura. • Las lecturas pueden verse afectadas por interferencias eléctricas. • La escritura frecuente puede saturar la memoria SD si no se limita la duración del muestreo.
<p>Modularidad del código, detección en tiempo real y registros:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Código estructurado en <code>setup()</code> y <code>loop()</code>, permitiendo modificar o mejorar fácilmente secciones específicas. • Calcula los BPM a partir del tiempo transcurrido entre picos del pulso analógico, seguimiento casi en tiempo real. • Verifica y crea archivos .csv, evitando sobrescritura y asegurando persistencia de datos. 	<p>Software:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Umbral fijo para detección de picos (530): • El valor de corte es constante, lo cual no es ideal para todas las personas. Un umbral dinámico o adaptativo podría mejorar la precisión. <p>Lectura de BPM no estabilizada:</p> <ul style="list-style-type: none"> • El sistema responde al menor cambio de BPM, puede generar una lectura "parpadeante" en la pantalla.

Metodología

Etapa 1-Preparación de la base

1. En la placa de PET-ITO, se cortaron 2 cuadros de 2 x 2 cm, los cuales se colocaron en un baño ultrasónico 3 veces en ciclos de 480 segundos.

- Primer ciclo (agua ionizada).
- Segundo ciclo (acetona).
- Tercer ciclo (alcohol isopropílico).

2. Posteriormente, se recortaron 2 cuadros de acetatos de 2 x 2 cm sin lavar en los cuales se les dibujo la forma que tendría el biosensor y donde respectivamente se agregaría tinta de plata.

3. La geometría de las placas se define, y una lámina de KAPTON se coloca sobre las áreas marcadas. El recorte de KAPTON se desprende y adhiere sobre las superficies de PET-ITO, permitiendo la aplicación de la tinta conductora de plata. Las muestras fueron sometidas a un tratamiento térmico en horno durante 3 horas y almacenadas en una gaveta.

Etapa 2-Aplicación de las sustancias.

La plantilla de KAPTON se retiró cuidadosamente y se dispersó en baño ultrasónico con PEDOT:PSS, sílice mesoporoso (MCM-41) y nanopartículas de óxido de zinc, realizando ciclos de 480 segundos. Después de la remoción, las placas fueron sometidas a un calentamiento controlado. Durante este proceso, se depositaron soluciones de PEDOT:PSS, nanopartículas de óxido de zinc, cloruro de sodio, nitrato de plata y MCM-41 en las zonas correspondientes a los electrodos de referencia y de trabajo.

Etapa 3-Medición

1. Se recolectaron muestras de sudor de dos individuos sometidos a un estado de estrés físico y a un estrés inducido.
2. Las muestras de sudor se diluyeron con agua destilada para agregarlas al electrodo de referencia y de trabajo en el biosensor.

3. Las muestras recolectadas se colocaron en los sensores entre los tres electrodos y se realizaron mediciones I-V utilizando el analizador de parámetros semiconductores Keysight B1500A.

Implementación de los dispositivos

El uso de los dispositivos se lleva a cabo cuando el sujeto enfrenta estrés o ansiedad, midiendo su frecuencia cardíaca mediante un sensor en la muñeca. Para medir la conductividad, se toma una mues

tra del sudor del sujeto en el dispositivo. Se tomará una muestra de sudor del sujeto durante la situación, se medirá su conductividad en un dispositivo y los datos obtenidos se analizarán y graficarán para compararlos con bases de datos, determinando así si la persona está en estado de estrés o ansiedad.

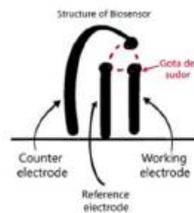


Figura 5: Diseño del biosensor que se hizo sobre el PET-ITO.

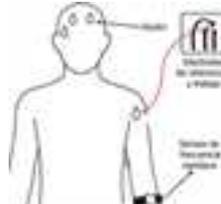


Figura 6. Esquema de la implementación de los dispositivos.

Resultados

Dispositivo B (ZnO + MCM-41)

Se esperaba observar curvas claras de óxido-reducción; sin embargo, en el dispositivo B sólo se aprecia parcialmente el avance y retorno de la señal y no es posible identificar de forma inequívoca picos de oxidación o reducción. Sí se registró corriente de carga, pero la respuesta no coincide con la hipótesis inicial (aumento de conductividad en condiciones de estrés). [21]

En las pruebas (Figura 7) con el sujeto 1 —comparando sudor por actividad física (control) frente a sudor inducido por estrés— se observó una disminución de

la corriente en condiciones de estrés, en lugar del incremento esperado. Esta conducta sugiere la presencia de artefactos o interferencias experimentales; una causa probable es el contacto directo de las pistas de plata con el ITO, que puede saturar el sensor y comprometer las mediciones. Al comparar ambos sujetos se aprecia que el sujeto 1 presenta una diferencia marcada en la corriente entre control y estrés, mientras que el sujeto 2 muestra poca o nula variación. Complementando con los datos de frecuencia cardiaca, el sujeto 1 presentó un aumentosostenido de la FC durante la inducción de estrés, y el sujeto 2 permaneció estable.

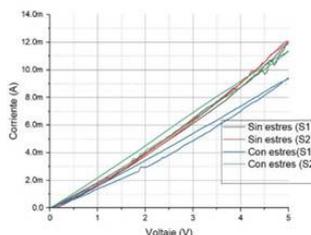


Figura 7. Medición del sudor de los sujetos 1 y 2 antes de someterse a estrés y después de estar bajo estrés con el dispositivo 2. Fuente: propia.

Al comparar ambos sujetos se aprecia que el sujeto 1 presenta una diferencia marcada en la corriente entre control y estrés, mientras que el sujeto 2 muestra poca o nula variación. Complementando

con los datos de frecuencia cardiaca, el sujeto 1 presentó un aumento sostenido de la FC durante la inducción de estrés, y el sujeto 2 permaneció estable.

Causas plausibles de la disminución de corriente detectada bajo estrés

- Exceso de Cl^- , el cual puede reaccionar con la Ag y bloquear el electrodo. [12]
- Algunas proteínas o péptidos que se hayan adsorbido en el sensor, reduciendo el paso de la carga.
- Acumulación de metabolitos como el ac. Úrico o láctico, que podrían estar saturando o bloqueando la superficie activa del sensor. [13]

Al correlacionar la frecuencia cardiaca con las respuestas electroquímicas registradas en la Figura 8, el sujeto 1 presentó un incremento sostenido de la FC acompañado de cambios en el dispositivo B, lo que es consistente con un estado de estrés. El sujeto 2 no mostró alteraciones apreciables en ninguno de los parámetros analizados.

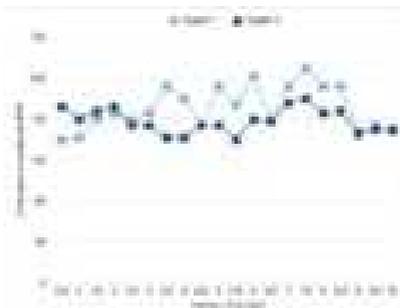


Figura 8. Resultados de la frecuencia cardíaca obtenidos antes, durante y después de la situación de estrés a la que se sometieron los sujetos 1 y 2. Fuente: propia.

Dispositivo A (PEDOT:PSS y DMSO)

En la Figura 9, que contiene respuestas a muestras de sudor con y sin estrés, se esperaba visualizar una curva de óxido-reducción, pero nuevamente interfiere el corto causado por el ITO. Sin embargo, se logra ver que hay mayor corriente en el rango de voltajes negativos, lo cual indica que hay una mayor concentración de compuestos reductores. En este caso, también podría ser la reducción del agua dado que ocurre en este mismo rango. En el rango de voltajes positivos se nota una cierta cantidad de variabilidad, lo cual podría estar relacionado con la oxidación de las catecolaminas presentes en la muestra de sudor que se oxidan en este rango. [3]

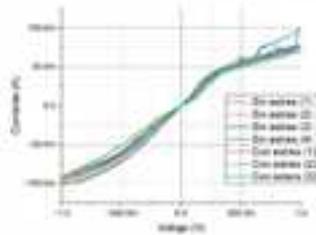


Figura 9. Mediciones del sensor a muestras de sudor obtenidas en condiciones de estrés y sin estrés. Fuente: propia.

Conclusiones

Los hallazgos iniciales indican una distinción entre los analitos con niveles elevados de catecolaminas y los grupos de comparación. Esta diferencia fue deducida a partir de la combinación de los datos recogidos de los dos tipos de sensores. Para validar estos resultados, se podrían utilizar enfoques que permitan establecer una conexión mediante una variable compartida, como el tiempo, para verificar

si los picos más altos se logran en situaciones similares. Además, es aconsejable llevar a cabo mediciones utilizando analitos puros (epinefrina, norepinefrina y dopamina) en un entorno controlado. Esto ayudará a definir los rangos de detección de los sensores diseñados, fundamentándose en sus propiedades estructurales y funcionales específicas.

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

Conflicto de interés

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

Agradecimientos

A los docentes y asesores por el apoyo brindado durante la formación académica, unidades académicas, secretarías, empresas.

Introduction

Anxiety disorders are a common mental health problem that affects millions of people around the world, including Mexico. According to the WHO, in 2019, 301 million people suffered from anxiety disorders. It is currently estimated that about 4% of the world's population suffers from some anxiety disorder. People with anxiety disorders experience intense and excessive fear and worry, accompanied by physical, behavioral and cognitive symptoms [1].

Approximately only 27.6% of people who need treatment for mental disorders receive it. Obstacles include lack of awareness of the treatability of these problems, insufficient investment in mental health services, shortage of trained health personnel and social stigma [1].

Heart rate and electrodermal response are physiological parameters related to stress and anxiety. Heart rate is a common indicator of stress and anxiety, as it increases in response to stressful stimuli.

Catecholamines (dopamine, adrenaline, and noradrenaline) are a group of hormones, they prepare the body for the stress response, raising the cardiac frequency, arterial pressure and inducing an alert state. They are present in human sweat and can be measured to track changes in its concentration, providing us with

key information strictly related to stress response. For this reason, catecholamines are considered a potent stress biomarker, this opens the door to creating a sensor capable of measuring changes in the concentration of these molecules [2].

To measure these molecules, we can use electrochemical detection. This technique tracks the change in electrical signals to detect active compounds. More specifically, it measures the electric current produced by the oxidation or reduction of an analyte on the surface of an electrode [3]. This is ideal for targeting catecholamines. The oxidation potential for noradrenaline and adrenaline is between +0.6 V and +0.8 V. Applying a voltage in this specific range, the sensor can selectively oxidize the molecules, minimizing the interference with other substances in sweat. In this process, a chemical species lost an electron (oxidation) and generated a measurable electrical signal directly related to the analyte's concentration [4].

However, sensor sensitivity is a critical factor, because catecholamines may be present in very low concentrations in sweat, a sensor must have a high signal-to-noise ratio. This allows it to accurately measure even slight changes in catecholamine levels, making it an essential feature for an effective and accurate stress monitoring tool [2].

Development

Structural Composition of the Devices Designed for Sweat Monitoring

Two experimental prototypes were designed (Figure 1). Device A consists of a polyethylene terephthalate substrate coated with indium tin oxide (PET-ITO), onto which three silver ink electrodes were integrated, configured as counter electrode, working electrode, and reference electrode. The sensing layers consist of PEDOT:PSS doped with dimethyl sulfoxide (DMSO), deposited on the working electrode, and a silver nitrate–sodium chloride ($\text{AgNO}_3\text{-NaCl}$) system applied to the reference electrode.

Device B exhibits a structural configuration similar to that of Device A; however, it incorporates zinc oxide (ZnO) nanoparticles immobilized within a mesoporous silica matrix, both synthesized at the Laboratory of Technological Applications of Semiconductors. This composite was deposited onto the working electrode.

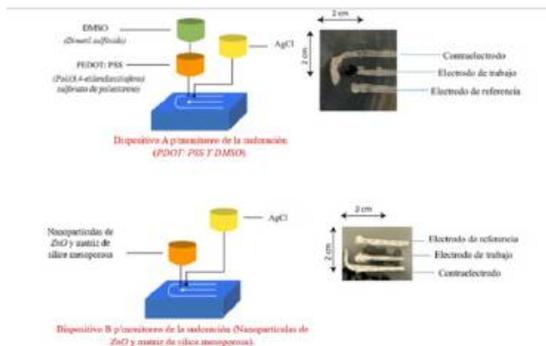


Figure 1. Structural composition and molecular interactions between components. Source: own image.

PEDOT: PSS

Poly(3,4-ethylenedioxythiophene):polystyrene sulfonate is a material extensively studied for its semiconducting properties due to its broad range of electrical conductivity. This value depends on synthesis conditions, additive processing, or post-treatment procedures [5]. Both post-treatment and the incorporation of various additives have been employed as effective and straightforward strategies to enhance its performance in diverse applications [6].

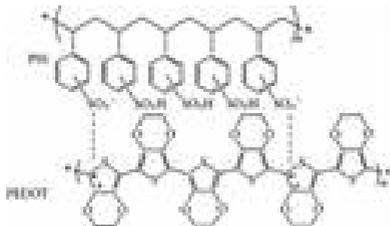


Figure 2. Chemical structure of PEDOT: PSS. Source: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2020.109726>.

The sulfonate group of PSS (SO_3^-) stabilizes the positive charge of the polarons present along the PEDOT chain (Figure 3a) [8]. The movement of these polarons along the conjugated backbone imparts semiconducting properties to PEDOT. However, this capability also depends on the proportion of PSS content. As the PSS content increases, electrical conductivity decreases [9] due to its insulating behavior.

To enhance the conductivity of PEDOT:PSS, this study employed dimethyl sulfoxide (DMSO) as a co-solvent at low concentrations. The high dielectric constant of DMSO reduces the electrostatic forces that bind the PEDOT and PSS chains. By weakening this interaction, PSS is partially removed and undergoes structural reorganization, allowing PEDOT chains to couple more efficiently and facilitating improved charge transport through the formation of more continuous structural networks (Figure 3b) [10].

Mahato et al. (2020) determined that a DMSO concentration close to 5% is optimal, as it induces a conformational change from a spheroidal to an ellipsoidal morphology in PEDOT:PSS domains (Figure 4b), which is proposed to be the most favorable structure for enhancing electrical conductivity.

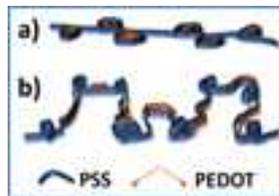


Figure 4. Schematic morphological models of PEDOT:PSS (doped with 2.5, 5 and 7.5% DMSO) Source: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.143967>

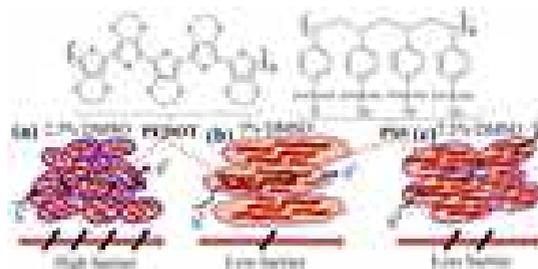


Figure 3. Schematic representation of the interaction between PEDOT:PSS and DMSO. Source: https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0014305720302433-gr5_lrg.jpg

Mesoporous Silica Matrix and ZnO Nanoparticles

To improve the performance of the interface between the electrode and the analyte, a composite material based on zinc oxide (ZnO) nanoparticles dispersed over a mesoporous silica matrix was selected. It is well known that ZnO nanoparticles tend to spontaneously aggregate in solution, a characteristic that limits the interactions the composite can establish

with the analyte by reducing its effective surface area. This phenomenon poses a challenge when attempting to develop a high-sensitivity sensor, as proposed in this study. Therefore, dispersion throughout the mesoporous silica matrix was essential to enable better interaction between the composite and the analyte.

Heart Rate Device

An infrared sensor operates by emitting and detecting a beam of light near the infrared spectrum; variations in the received intensity, caused by blood flow at the wrist, allow pulse detection. For data acquisition, an Arduino UNO board was programmed to display readings on an LCD screen and to store data on an SD card in two .csv files: one with processed values (BPM) and another with the raw analog readings.

BPM is calculated from the time elapsed between peaks detected in the analog signal (inter-beat interval detection). The code is organized into `setup()` and `loop()` functions, includes routines to check/create .csv files, and prevents overwriting when starting new sessions—facilitating subsequent analysis and data traceability.

Advantages	Disadvantages
<p>Data storage and interface:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Uses an SD card to save both processed (BPM) and raw (analog) data, enabling post-processing and backup. • The LCD provides immediate local feedback without relying on a serial monitor. 	<p>Hardware: contact issues (false positives)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Poor or intermittent contacts among the infrared sensor, LCD and Arduino can produce irregular BPM spikes, compromising reading reliability. • Readings may be affected by electrical interference • Frequent writes can saturate the SD card if sampling duration is not limited.
<p>Code modularity, real-time detection and logging</p> <ul style="list-style-type: none"> • Code structured in <code>setup()</code> and <code>loop()</code>, allowing targeted modifications and improvements. • Calculates BPM from the time between detected pulse peaks, providing near real-time monitoring. • Verifies and creates .csv files, preventing overwrites and ensuring data persistence. 	<p>Software:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fixed peak detection threshold (530): A static threshold is not ideal across different users; an adaptive threshold would likely improve accuracy. • Unstable BPM readings: The system reacts to small changes in BPM and can produce a “flickering” display of values.

Methodology

Stage 1 – Base Preparation

1. On the PET-ITO plate, 2 squares of 2 x 2 cm were cut and placed in an ultrasonic bath 3 times in cycles of 480 seconds.

First cycle (ionized water).

Second cycle (acetone).

Third cycle (isopropyl alcohol).

2. Next, two 2 x 2 cm squares of unwashed acetate were cut out, on which the shape of the biosensor was drawn and where, respectively, silver ink was added.

3. The geometry of the plates is defined, and a KAPTON sheet is placed over the marked areas. The KAPTON trim is peeled

Stage 3 - Measurements

1. Sweat samples were collected from two individuals under physical stress and induced stress.
2. The sweat samples were diluted with distilled water to be later added to the reference and working electrode in the biosensor.

off and adhered to the PET-ITO surfaces, allowing the application of the conductive silver ink. The samples were heat-treated in an oven for 3 hours and stored in the drawer.

Stage 2 – Application of the substances.

1. The KAPTON template was carefully removed and dispersed in an ultrasonic bath with PEDOT:PSS, mesoporous silica (MCM-41), and zinc oxide nanoparticles, performing 480-second cycles. After removal, the plates were subjected to controlled heating. During this process, solutions of PEDOT:PSS, zinc oxide nanoparticles, sodium chloride, silver nitrate, and MCM-41 were deposited on the areas corresponding to the reference and working electrodes.

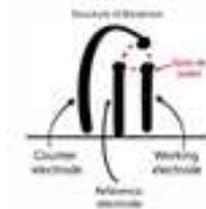


Figura 5: Diseño del biosensor que se hizo sobre el PET-ITO.

Implementation of the devices

The use of devices is used when the subject is experiencing stress or anxiety, measuring their heart rate using a sensor on the wrist. To measure conductivity, a sample of the subject's sweat is taken into the device. A sample of the subject's sweat will be taken during the situation, its conductivity will be measured on a device, and the data obtained will be analyzed and graphed for comparison with databases, thus determining whether the person is experiencing stress or anxiety.

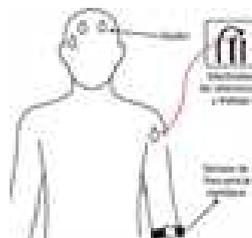


Figure 6. Schematic of device implementation.

Results

Device B (ZnO + MCM-41)

Clear redox (oxidation–reduction) curves were expected; however, for Device B only the forward and return portions of the signal are partially apparent, and it is not possible to unequivocally identify oxidation or reduction peaks. Charge current was recorded, but the response does not match the initial hypothesis (an increase in conductivity under stress conditions). [11]

In the tests (Figure 7) with subject 1 – comparing sweat from physical activity (control) to sweat induced by stress – a decrease in current was observed under stress conditions instead of the expected increase. This behavior suggests the presence of experimental artifacts or interferences; a likely cause is direct contact of the silver tracks with the ITO, which may saturate the sensor and compromise measurements.

Comparing both subjects shows that subject 1 exhibits a marked difference in current between control and stress, whereas subject 2 shows little or no variation. Complementary heart-rate data indicate that subject 1 experienced a sustained increase in HR during stress induction, while subject 2 remained stable.

Plausible causes for the observed decrease in current under stress

- Excess Cl^- , which can react with Ag and block the electrode. [12]
- Adsorption of proteins or peptides on the sensor, reducing charge transfer.
- Accumulation of metabolites such as uric or lactic acid, which may saturate or block the sensor's active surface. [13]
- Catecholamines, which oxidize and tend to foul the electrodes, resulting in lower

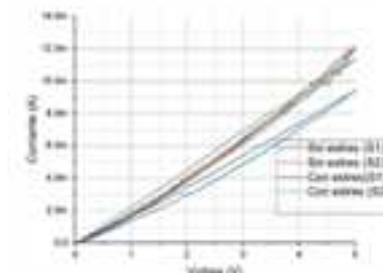


Figure 7. Measurement of sweat from subjects 1 and 2 before (control) and after stress with Device 2.

Source: own.

When correlating heart rate with the electrochemical responses recorded in Figure 8, subject 1 showed a sustained HR increase accompanied by changes in

Device B, consistent with a stress state. Subject 2 did not exhibit appreciable alterations in any of the analyzed parameters.

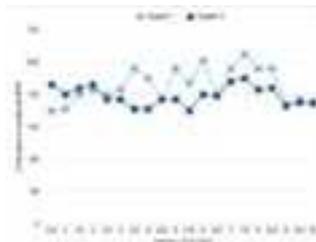


Figura 8. Resultados de la frecuencia cardíaca obtenidos antes, durante y después de la situación de estrés a la que se sometieron los sujetos 1 y 2. Fuente: propia.

Device A (PEDOT:PSS and DMSO)

In Figure 9, which contains responses to sweat samples with and without stress, a redox curve was expected, but once again the short circuit caused by the ITO interferes. Nonetheless, greater current is observed in the negative voltage range, which indicates a higher concentration of

reducing compounds. In this case, water reduction could also be responsible since it occurs in the same range. In the positive voltage range, there is some variability that could be related to oxidation of catecholamines present in the sweat samples, which oxidize in this range. [3]

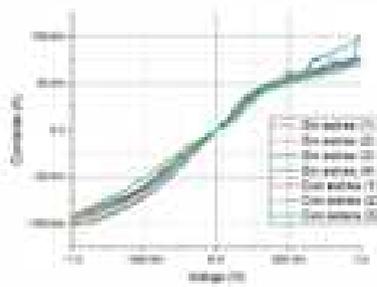


Figure 9. Sensor measurements for sweat samples obtained under stress and non-stress conditions. Source: own.

Conclusions

Initial findings indicate a distinction between analytes with elevated catecholamine levels and the comparison groups. This difference was inferred from combining the data collected from the two sensor types. To validate these results, approaches that establish a connection through a shared variable, such as time, could be used to verify whether

the highest peaks are achieved in similar situations. Furthermore, it is advisable to conduct measurements using pure analytes (epinephrine, norepinephrine, and dopamine) in a controlled environment. This will help define the detection ranges of the designed sensors, based on their specific structural and functional properties.

Privacy statement

The data in this article, as well as the technical details for conducting the experiment, can be shared upon direct request to the corresponding author. The personal data provided by the authors to RD-ICUAP will be used exclusively for the purposes stated by the latter and will not be available for any other purpose or provided to third parties.

Conflict of interest

The authors of this manuscript declare that they have no conflict of interest.

Acknowledgments

To the teachers and advisors for their support during academic training, academic units, secretaries, companies.

Referencias

- World Health Organization: WHO. (2023, 27 September). Trastornos de ansiedad. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/anxiety-disorders>
- Ferry, Y., & Leech, D. (2004). Amperometric detection of catecholamine neurotransmitters using electrocatalytic substrate recycling at a laccase electrode. *Electroanalysis*, 17(2), 113–119. <https://doi.org/10.1002/elan.200403069>
- Saputra, H. A. (2023). Electrochemical sensors: basic principles, engineering, and state of the art. *Monatshefte Für Chemie - Chemical Monthly*, 154(10), 1083–1100. <https://doi.org/10.1007/s00706-023-03113-z>
- Ma, X., Chen, M., Li, X., Purushothaman, A., & Li, F. (2012). Electrochemical detection of norepinephrine in the presence of epinephrine, uric acid and ascorbic acid using a graphene-modified electrode. *International Journal of Electrochemical Science*, 7(2), 991–1000. [https://doi.org/10.1016/s1452-3981\(23\)13389-x](https://doi.org/10.1016/s1452-3981(23)13389-x)
- Panigrahy, S., & Kandasubramanian, B. (2020). Polymeric thermoelectric PEDOT: PSS & composites: Synthesis, progress, and applications. *European Polymer Journal*, 132(109726), 109726. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2020.109726>
- Wang, X., Meng, F., Wang, T., Li, C., Tang, H., Gao, Z., Li, S., Jiang, F., & Xu, J. (2018). High performance of PEDOT:PSS/SiC-NWs hybrid thermoelectric thin film for energy harvesting. *Journal of alloys and compounds*, 734, 121–129. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.11.013>
- Liu, S., Deng, H., Zhao, Y., Ren, S., & Fu, Q. (2015). The optimization of thermoelectric properties in a PEDOT:PSS thin film through post-treatment. *RSC advances*, 5(3), 1910–1917. <https://doi.org/10.1039/c4ra09147g>
- Bredas, J. L., & Street, G. B. (1985). Polarons, bipolarons, and solitons in conducting polymers. *Accounts of Chemical Research*, 18(10), 309–315. <https://doi.org/10.1021/ar00118a005>

Mahato, S., Puigdollers, J., Voz, C., Mukhopadhyay, M., Mukherjee, M., & Hazra, S. (2020). About 5% DMSO is best: A structural investigation of PEDOT: PSS thin films with a strong emphasis on surface and interface for the hybrid solar cell. *Applied Surface Sciences*, 499(143967), 143967. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.143967>

Mahato, S., Puigdollers, J., Voz, C., Mukhopadhyay, M., Mukherjee, M., & Hazra, S. (2020). Cerca del 5% de DMSO es lo mejor: Una investigación estructural de PEDOT: películas delgadas PSS con un fuerte énfasis en la superficie y la interfaz para la célula solar híbrida. *Ciencia Aplicada de la Superficie*, 499, 143967.

Khan Academy. (s.f.). Números de oxidación. Khan Academy. <https://es.khanacademy.org/science/ap-chemistry/chemical-reactions-ap/types-of-chemical-reactions-ap/a/oxidation-number>

UNAM Global. (2021, 30 de abril). Todo lo que necesitas saber sobre el sudor. https://unamglobal.unam.mx/global_revista/todo-lo-que-necesitas-saber-sobre-el-sudor/

Li, Z., Wang, Y., Fan, Z., Sun, Y., Sun, Y., Yang, Y., ... Zhu, Z. (2023). A dual function wearable electrochemical sensor for uric acid and glucose sensing in sweat. *Biosensors*, 13(1), 105. <https://doi.org/10.3390/bios13010105>



NOTAS

RD-IGUAP

AÑO 11 NO. 33

DIVULGANDO LA IMPORTANCIA DE LOS MATERIALES QUE NOS AYUDAN A COMBATIR LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA

Dra. Marfa de La Paz Elizalde González

Por: Dra. Lidia Esmeralda García Díaz

Palmar de Bravo, Pue. 11 de junio 2025

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

Folio: A11N96.25/1012

Divulgando la importancia de los materiales que nos ayudan a combatir la contaminación del agua

Alrededor de 150 estudiantes de nivel preparatoria acuden al auditorio del DIF municipal de Palmar de Bravo para asistir a la conferencia “Los materiales y el combate a la contaminación del agua” impartida por la Dra. María de la Paz Elizalde González, investigadora emérita de la BUAP.

La Dra. Elizalde fue recibida por autoridades municipales, comités del agua, directivos y estudiante del CBTIS 254 “Emiliano Zapata” y del CBTA 254 de Cuacnopalan en el marco de una campaña del uso sostenible del agua que tienen ambas instituciones.

En la conferencia se presentó el estado actual del agua en el mundo, resaltando la crisis hídrica en nuestro país en función de la geografía que tiene México y del uso que le damos al agua. También se presentaron ejemplos de materiales desarrollados en el Laboratorio de Adsorción y Cromatografía del Centro de Química del Instituto de Ciencias para remover contaminantes específicos del agua.

La Dra. Elizalde, con más de 30 años de experiencia docente, captó el interés de los estudiantes para reflexionar si tenemos el derecho de desperdiciar o contaminar el líquido vital y de la importancia de la investigación en materiales que nos ayudan a combatir la contaminación del agua.



**IN MEMORIAM:
JULIETA FIERRO
(1948-2025)**

RD-ICUAP

Año 11, No. 33, 2025, pp. 255 - 261

ISSN 2448-5829



In memoriam: Julieta Fierro

(1948-2025)



El fallecimiento de Julieta Norma Fierro Gossman (1948-2025), a los 77 años, representa la pérdida de una figura central en la ciencia y la cultura de México. Reconocida como la divulgadora científica más importante que ha tenido el país, su labor trascendió fronteras, obteniendo un reconocimiento internacional equiparable, en palabras de sus colegas, a un "Premio Nobel en divulgación". Fierro transformó la percepción pública de la ciencia, utilizando métodos innovadores y accesibles que combinaban rigor con humor, comedia y danza para acercar el cosmos a generaciones enteras.

Más allá de su rol como comunicadora, fue una investigadora titular en el Instituto de Astronomía de la UNAM y una defensora incansable del papel de la mujer en la ciencia, inspirando a miles de niñas y jóvenes a seguir carreras científicas. Su legado se manifiesta en más de 40 libros, innumerables conferencias, la creación de espacios museísticos como la sala de astronomía de Universum, y un profundo impacto en la política pública y social, abogando por causas como los derechos reproductivos y la defensa de la comunidad científica. Su partida deja un vacío inmenso, pero también un camino claramente trazado sobre la importancia

de una comunicación científica humana, accesible y comprometida con la sociedad.

Julieta Norma Fierro Gossman, nacida en la Ciudad de México el 24 de febrero de 1948, fue una física y astrónoma de formación. Cursó la licenciatura en Física (titulada en 1974) y posteriormente una maestría en Astrofísica en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

En la Investigación, se desempeñó como investigadora titular de tiempo completo en el Instituto de Astronomía de la UNAM. Su trabajo de investigación se centró principalmente en la materia interestelar, y sus estudios más recientes abordaron el Sistema Solar.

En la docencia: Fue profesora en la Facultad de Ciencias de la UNAM, donde impartió clases y grabó un curso en línea de acceso libre para ampliar el alcance de su enseñanza.

Su gran labor logró gran Reconocimiento Académico: Perteneció al Sistema Nacional de Investigadores (SNI) en su nivel más alto (Nivel III), un testimonio de su destacada producción científica y académica.

Cargos y Membresías Relevantes

A lo largo de su carrera, ocupó posiciones de liderazgo que le permitieron moldear el panorama de la divulgación científica en México y a nivel internacional.

- **Dirección en la UNAM:** Fue Directora General de Divulgación de la Ciencia de la UNAM de marzo de 2000 a enero de 2004.
- **Organismos Internacionales:** Ocupó la vicepresidencia y presidencia de la Comisión de Educación de la Unión Astronómica Internacional.
- **Academias:** El 24 de julio de 2003 fue elegida miembro de número de la Academia Mexicana de la Lengua, tomando posesión de la silla XXV el 26 de agosto de 2004. En 2023, fue nombrada miembro honorario de la Academia Estadounidense de las Artes y las Ciencias.
- **Asociaciones Nacionales:** Presidió la Academia Mexicana de Profesores de Ciencias Naturales y la Asociación Mexicana de Museos de Ciencia y Tecnología.

Legado en la Divulgación Científica

La labor más destacada y reconocida de Julieta Fierro fue su trabajo pionero y transformador en la divulgación de la ciencia, que redefinió la comunicación científica en México.

Una Pionera de la Comunicación Científica

Fierro es considerada una figura fundacional en la divulgación científica moderna en México. El Dr. José Franco, investigador del Instituto de Astronomía de la UNAM, la describió como "la divulgadora más importante que ha tenido nuestro país" y afirmó que, de existir un Premio Nobel en divulgación, ella sería su equivalente. Su objetivo principal era llevar el conocimiento científico a todo público, haciendo accesibles temas complejos y fomentando una cultura científica en la sociedad.

Su éxito radicaba en un enfoque que rompía con la solemnidad académica. Su método buscaba que el aprendizaje fuera "divertido y cercano". Para lograrlo, empleó una variedad de herramientas poco convencionales:

Carácter Lúdico: Usaba objetos cotidianos, disfraces y un lenguaje coloquial para explicar fenómenos complejos.

Artes Escénicas: Incorporaba la comedia, la actuación y el baile en sus presentaciones. Famosamente, formó un grupo de mambo llamado "Las mamberas de Minerva" y compuso un mambo en honor a Galileo ("Y sin embargo se mueve"), que utilizaba en conferencias para hacerlas más dinámicas y memorables.

Narrativa Personal: En una entrevista con La Cadera de Eva, demostró su habilidad para conectar con la gente a través de anécdotas personales, hablando de su infancia, sus pasiones por el tarot (como herramienta de desahogo y conexión humana, no como método predictivo) y el ballet.

Producción y Alcance

Su producción fue prolífica y multifacética, abarcando prácticamente todos los medios de comunicación.

Publicaciones: Escribió 41 libros, de los cuales 23 son de divulgación científica, muchos de ellos dirigidos a públicos infantil y juvenil. También redactó decenas de artículos diversos, incluyendo uno en lengua maya.

Conferencias: Dictó centenares de conferencias en 39 países, presentándose en escuelas, plazas públicas y ferias de ciencia.

Museografía: Fue una figura clave en la creación de museos de ciencia. Dirigió la realización de la sala de astronomía de Universum, Museo de las Ciencias de la UNAM, y fue directora del mismo. Colaboró en la creación del Museo Descubre de Aguascalientes, un museo en Puerto Rico y observatorios en Estados Unidos y Sudáfrica.

Medios Audiovisuales: Participó activamente en radio y televisión. Condujo programas como "Sofía Luna, agente especial" en Canal Once y "Más allá de las estrellas", que fue premiado como mejor video científico en 1998.

Impacto en las Mujeres y la Sociedad

El trabajo de Julieta Fierro trascendió el ámbito científico, convirtiéndola en un emblema social y una voz influyente en causas de justicia y equidad.

Emblema de las Mujeres en la Ciencia

Julieta Fierro es reconocida como uno de los "emblemas de la lucha de las mujeres por ser reconocidas en todos los ámbitos de la ciencia". Desde su posición en la UNAM, amplificó constantemente el mensaje sobre la importancia del trabajo de las mujeres científicas. Su labor fue fundamental para inspirar a una gran cantidad de niñas y jóvenes a incursionar en carreras científicas. Ella misma lo resumió en una de sus citas más recordadas:

"¿Y por qué queremos mujeres en la ciencia? Porque hay muchos problemas de las mujeres que no se han resuelto. No porque los hombres sean mala onda, pero no conocen nuestros problemas."

Activismo y Defensa de la Ciencia

Su compromiso social fue una constante en su vida. Julieta Fierro fue una mujer de carácter resiliente que luchó activamente por diversas causas:

Derechos de la Mujer: En su juventud, junto a figuras como Martha Lamas y Patricia Mercado, abogó ante Olga Sánchez Cordero por la legalización del aborto.

Muerte Digna: En sus últimos años, se involucró en la lucha por el derecho a una muerte digna.

Defensa de Científicos: Durante la persecución de científicos en México en años recientes, "ella levantó la voz para defender" a sus colegas, un acto de valentía que le valió el agradecimiento de la comunidad.

Personalidad y Carácter

Quienes la conocieron la describen como una persona "jovial, activa, simpática, sin pretensiones" y, sobre todo, una "buena persona" a quien el éxito nunca se le subió a la cabeza. Sus intereses iban más allá de la ciencia, incluyendo pasiones como el ballet y los bailes de salón. Su deseo infantil de ser "cirquera" o "hada" revela un carácter imaginativo que supo integrar a su labor profesional, demostrando que la ciencia y la creatividad no son mundos separados.

Premios y Distinciones en Vida

El impacto de su trabajo fue reconocido con numerosos premios nacionales e internacionales, así como con tres doctorados honoris causa. Varias escuelas, bibliotecas y planetarios en México llevan su nombre.

- Premio/Reconocimiento Otorgante
- Premio de Divulgación de la Ciencia/Academia de Ciencias del Mundo en Desarrollo (TWAS)
- Premio Kalinga/UNESCO (1995)
- Premio Klumpke-Roberts/Sociedad Astronómica del Pacífico (1998)
- Medalla de Oro Primo Rovis/Centro de Astrofísica Teórica de Trieste (1996)
- Premio Latinoamericano de Popularización de la Ciencia/RedPOP, Chile (2001)
- Medalla al Mérito Ciudadano/Asamblea de Representantes del D.F. (2003)
- Medalla Benito Juárez (2004)
- Reconocimiento Flama/Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL)
- Medalla Sor Juana Inés de la Cruz UNAM
- Medalla Omecihuatl
- Por su labor a favor de las mujeres

- Medalla al Mérito en Ciencias Inge-
niero Mario Molina/Congreso de la
Ciudad de México (2021)
- Doctorados Honoris Causa/CITEM
(2006), UMSNH (2009), UABJO
(2017)

Reconocimientos y Homenajes Póstumos

Reacciones a su Fallecimiento

Su muerte el 19 de septiembre de 2025 generó una ola de condolencias que demostró el alcance de su influencia.

- Instituciones: La UNAM lamentó el fallecimiento de quien llamó un "#OrgulloUNAM".
- Gobierno: La presidenta de México, Claudia Sheinbaum Pardo, y diversas figuras políticas de partidos como el PRI y Morena expresaron su pesar.
- Congreso: La Cámara de Diputados le rindió homenaje con un minuto de aplausos, con legisladoras de todos los partidos destacando su rol como inspiración para las mujeres.
- Comunidad Científica y Público: Colegas como Juan Carlos Yustis expresaron su "profundo dolor",

mientras que en redes sociales, ciudadanos lamentaron la partida de quien les "enseñó que todos somos polvo de estrellas".

La Dra. María Lilia Cedillo Ramírez expresó sus condolencias a los familiares y amigos de la divulgadora Julieta Fierro, y aseguró que desde la BUAP, la comunidad universitaria se une para honrar su legado.

"Su luz seguirá brillando en cada mente que despierte amor por la ciencia", dijo la rectora de la Máxima Casa de Estudios.

Para RD-ICUAP fue un gran honor el tenerla en nuestro décimo aniversario, una de las tantas veces que esparció su sabiduría, sencillez y calidad humana en la BUAP.

El Futuro de la Divulgación

El camino abierto por Julieta Fierro continúa expandiéndose. Hoy, una nueva generación de divulgadoras científicas mexicanas, como Sara ("Morra Científica"), Mireya Márquez y Patricia Hernández Reséndiz ("Astrofísicos en Acción"), utiliza plataformas digitales y redes sociales para seguir acercando la ciencia a nuevos públicos, adaptando el espíritu innovador de Julieta Fierro a las herramientas del siglo XXI.

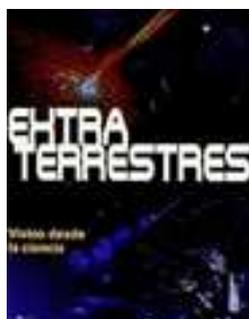
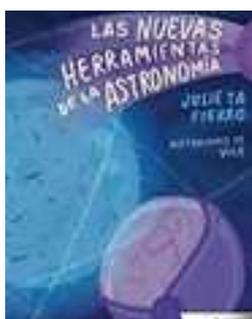
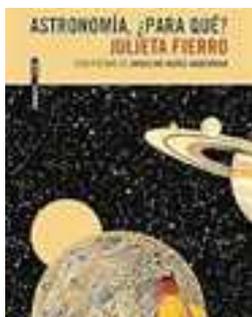
RD-ICUAP con profundo pesar lamenta el fallecimiento de la Dra. Julieta Norma Fierro Gossman

Su partida deja un vacío inmenso en los corazones de quienes tuvimos el privilegio de conocerle.

fue una persona ejemplar, recordada por su generosidad, su calidez humana y su inquebrantable espíritu.

Acompañamos en el dolor a su familia y seres queridos, y elevamos nuestras oraciones por el eterno descanso de su alma.

19 septiembre 2025



Referencias

- **Cámara de Diputados.**** (s.f.). *Minuto de aplausos en memoria de Julieta Fierro Gossman, astrónoma mexicana* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=nIICPEOw3es>
- **Delgado, K.**** (2023, 11 de febrero). *Mujeres en la ciencia: 12 divulgadoras mexicanas que debes conocer*. Chilango.
- **Escalón, E.**** (s.f.). *Para comunicar la ciencia no bastan los datos duros: Ana María Sánchez Mora*. Universidad Veracruzana.
- **Islas Rodríguez, A. E.**** (2021). Pelear por el presupuesto para la divulgación científica. *Boletín de la Sociedad Química de México*.
- **López, M. O.**** (2025, 19 de septiembre). *Julieta Fierro, la científica que visibilizó el trabajo profesional de las mujeres*. Martha Olivia.
- **Noticias Aristegui.**** (s.f.). *Julieta Fierro fue la divulgadora más importante que ha tenido México: Franco* [Video]. YouTube.
- **Rojas, S.**** (2025, 19 de septiembre). *Adiós a Julieta Fierro, la astrónoma mexicana que nos acercó el universo*. La Cadera de Eva.
- **Romero Santiago, J. A.**** (2025, 19 de septiembre). *Adiós a Julieta Fierro, el mundo de la ciencia le dedica emotivos mensajes a la destacada científica*. UnoTV.
- **[Autor no especificado].**** (s.f.). *Semblanza de la Dra. Julieta Fierro*.
- Julieta Fierro, la mujer que desafió a la ciencia | Milenio Pioneras. <https://www.youtube.com/watch?v=pxD-rzz3q2Q>
- Julieta Fierro: "La ciencia nos demuestra que no tenemos la verdad". https://www.youtube.com/watch?v=01hMSGUa_ms

