CienciAcierta

AÑO 22, NÚMERO 88

ISSN: 2683-1848 OCTUBRE-DICIEMBRE 2026 Latindex: 30518



latindex

DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE COAHUILA

creative commons

Foto: NASA / Wikimedia Commons / dominio público

PUBLICADA DESDE 2005

ISSN 2683-1848

CienciAcierta, año 22, No. 88 octubre-diciembre 2026, es una publicación trimestral editada por la **Universidad Autónoma de Coahuila**, Boulevard Venustiano Carranza s/n, colonia República Oriente, C.P. 25380, Saltillo, Coahuila.

Editor responsable: Dra. Anna Ilina. **Reserva de derechos al uso exclusivo:** No. 04-2019-010914143600-203, **ISSN:** 2683-1848, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. **Responsable de la última actualización de este número**: Departamento de Divulgación Científica de la Dirección de Investigación y Posgrado UAdeC, Lic. Loyda Esther Gil Noriega, Edificio D, planta alta, Unidad Camporredondo, Saltillo, Coahuila, C.P. 25280. **Fecha de última actualización:** 1° de octubre de 2026.

CienciAcierta es una revista académica de investigación científica, tecnológica y humanística, de carácter multidisciplinario, editada por la Dirección de Investigación y Posgrado de la Universidad Autónoma de Coahuila. Su objetivo es contribuir al avance del conocimiento mediante la publicación, difusión y visibilización de trabajos que promuevan el intercambio académico, la colaboración interinstitucional y el diálogo interdisciplinario, favoreciendo una comunicación científica accesible y confiable. Está registrada en el **Directorio de Latindex** (Folio 30518) y forma parte de **LatinREV**, la Red Latinoamericana de Revistas Académicas. Desde 2026 forma parte del **Sistema Nacional de Publicaciones Científicas y Humanísticas** (SNPCYH) de la SECIHTI. La revista está abierta a las contribuciones de autores nacionales e internacionales y fomenta la colaboración académica entre instituciones de educación superior, centros de investigación y organizaciones científicas.

Está dirigida a investigadores, docentes, estudiantes de licenciatura y posgrado y a público interesado en la ciencia, la tecnología y las humanidades. CienciAcierta publica artículos de investigación científica y humanística, artículos de revisión, reportes de caso y artículos de divulgación, conforme a las características y requisitos establecidos para cada tipo de texto en las instrucciones para autores. Su cobertura comprende **Ciencias de la Salud, Ciencias Sociales, Ciencias Naturales y Exactas, Ingeniería y Desarrollo Tecnológico y Humanidades**. Todo el material publicado cuenta con un reporte de análisis de similitud favorable y ha sido sometido a un proceso de **evaluación de doble ciego** por pares académicos.

EN PORTADA

La imagen muestra la Vía Láctea en rayos X, capturada por el Observatorio de Rayos X Chandra de la NASA. Esta imagen compuesta destaca la actividad energética en el centro galáctico y permite estudiar la estructura y fenómenos astrofísicos en nuestra galaxia. La imagen está disponible en dominio público a través de Wikimedia Commons, facilitando su uso libre para fines educativos y científicos. Más información en:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Milky_Way_Galaxy_in_X-rays_-_NASA_-_ESA_-_CXC_-_STScI_-_JPL-Caltech_-_UMass_-_JHU_-_STScI

CienciAcierta

Consejo Ejecutivo Editorial

Dra. Anna Ilina
Editor
annailina@uadec.edu.mx

Dr. Luis Gutiérrez Flores
Dirección de Investigación y Posgrado
luis.gutierrez@uadec.edu.mx

Dr. David Castro Lugo
Subdirección de Investigación-DIP
david.castro@uadec.edu.mx

Lic. Loyda E. Gil Noriega
Divulgación Científica-DIP
logiln@uadec.edu.mx

Comité Técnico Editorial Nacional e Internacional

Dra. Elda Patricia Segura C.
Químicas
Fac. de Ciencias Químicas-UAdeC
psegura@uadec.edu.mx

Dra. Gabriela de la Peña Astorga
Comunicación
Fac. C. de la Comunicación-UAdeC
gabriela.pena@uadec.edu.mx

Dr. Gustavo Félix Verduzco
Economía
CISE-UAdeC
gustavo.felix@uadec.edu.mx

Dra. Irma Delia García Calvillo
Matemáticas
CIMA-UAdeC
irma.garcia@uadec.edu.mx

Dr. Pablo Ruiz Flores
Ciencias de la Salud
CIB-UAdeC
pabloruiz@uadec.edu.mx

Dr. José González Tovar
Psicología
Fac. de Psicología-UAdeC
josegonzaleztovar@uadec.edu.mx

Dr. Manuel Gil Antón
Educación
El Colegio de México
mgil@colmex.mx

Dr. Juan Carlos Centeno Maldonado
Jurisprudencia
Fac. de Jurisprudencia UAdeC
centenojuan@uadec.edu.mx

Dra. Virginia Nevares Moorillón
Microbiología y C. Ambientales
Fac. Ciencias Químicas UACH
vnevare@uach.mx

Dra. Arely Prado Barragán
Biotecnología y alimentos
Universidad Autónoma Metropolitana
lapb@xanum.uam.mx

Dr. Gerardo Gutiérrez Sánchez
Ciencias Químicas y Biológicas
CCRC-University of Georgia, USA
gerardo@ccrc.uga.edu

Dr. Guillermo Picó
C. Bioquímicas y Farmacéuticas
Universidad Nacional de Rosario, Argentina
gpico@fbioyf.unr.edu.ar

Dr. Luis Huesca Reynoso
Economía
Centro de Investigación Alimentación y Desarrollo, México
lhuesca@ciad.mx

ÍNDICE

ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN

PRÁCTICAS ABUSIVAS EN EL ECOSISTEMA DIGITAL: LA VULNERABILIDAD DEL CONSENTIMIENTO FRENTE A LAS PLATAFORMAS TRANSNACIONALES 1

PRACTICES IN THE DIGITAL ECOSYSTEM: THE VULNERABILITY OF CONSENT AGAINST TRANSNATIONAL PLATFORMS

GAYTÁN ROMÁN, José De Jesús.

INTERFAZ VISUAL-AUDITIVA PARA PERSONAS DÉBILES VISUALES 12

VISUAL-AUDITORY INTERFACE FOR PEOPLE WITH VISUAL IMPAIRMENTS

PÉREZ CASILLAS, Alan Refugio; ZAVALA LUNA, Guadalupe; SANDOVAL GÓMEZ, María Fernanda; GÓMEZ CASAS, Josué; TORO ARCILA, Carlos Alberto; OBREGÓN FLORES, Jonathan Sebastián; ORTIZ RAMOS, Daniela Estefanía.

SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE SISTEMAS INTELIGENTES BASADOS EN POLI(ÁCIDO METACRÍLICO-CO-ANILINA) CON PERSPECTIVAS DE APLICACIÓN EN REMEDIACIÓN DEL AGUA 22

SYNTHESIS AND PHYSICOCHEMICAL CHARACTERIZATION OF SMART SYSTEMS BASED ON POLY(METHACRYLIC ACID-CO-ANILINE) WITH PROSPECTS OF APPLICATION IN WATER REMEDIATION

SÁNCHEZ OROZCO, Jorge Luis; HERNÁNDEZ RIVERA, Angélica; ROMERO ZÚÑIGA, Gabriela Yolotzin; SORIA ARGÜELLO, GUSTAVO; PUENTE URBINA, Bertha Alicia.

CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA Y ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE DE UNA BEBIDA FERMENTADA TIPO KOMBUCHA ELABORADA CON ORUJO DE *VITIS VINIFERA* 35

PHYSICOCHEMICAL CHARACTERIZATION AND ANTIOXIDANT ACTIVITY OF A KOMBUCHA-TYPE FERMENTED BEVERAGE MADE WITH VITIS VINIFERA GRAPE POMACE

BARRAZA AMAYA, José R.; RAMÍREZ GUZMÁN, Karen N.; FLORES LOYOLA, Erika; TORRES LEÓN, Cristian; SÁNCHEZ AGUIRRE, María C.; REYNA MARTÍNEZ, Ricardo.

MICROAGUJAS INTELIGENTES: EL FUTURO DE LA LIBERACIÓN TRANSDÉRMICA DE FÁRMACOS 51
SMART MICRONEEDLES: THE FUTURE OF TRANSDERMAL DRUG DELIVERY

RIVERA ESCOBEDO, Luis Antonio; MELÉNDEZ ORTÍZ, Héctor Iván; BETANCOURT GALINDO, Rebeca.

UNA APLICACIÓN DE S_3 EN LA CONSTRUCCIÓN DE LA MATRIZ DE MASA PARA LEPTONES CARGADOS 66
AN APPLICATION OF S_3 IN THE CONSTRUCTION OF THE MASS MATRIX FOR CHARGED LEPTONS

PÉREZ MARTÍNEZ, Ricardo.

ARTÍCULOS DE REVISIÓN

EFECTO DEL PWHT EN LA ACTUALIDAD: UNA REVISIÓN 88
CURRENT EFFECTS OF PWHT: A REVIEW

ZAPATA GARZA, Irving Gael; CRUZ HERNÁNDEZ, Ventura Lilia; SALAS TORRES, Luis Horacio; FALCÓN FRANCO, Lázaro Abdiel.

MODIFICACIÓN SUPERFICIAL DEL ÓXIDO DE GRAFENO MEDIANTE TRATAMIENTO CON PLASMA: UNA REVISIÓN 106
SURFACE MODIFICATION OF GRAPHENE OXIDE VIA PLASMA TREATMENT: A REVIEW

MORONES SILLAS, Jacqueline; FLORES VILLASEÑOR, Sergio Enrique; SORIA ARGÜELLO, Gustavo; NEIRA VELÁZQUEZ, María Guadalupe.

FIBRAS NATURALES COMO REFUERZO: PERSPECTIVAS EN CEMENTOS ALTERNATIVOS 129
NATURAL FIBERS AS REINFORCEMENT: PERSPECTIVES IN ALTERNATIVE CEMENTS

PEÑA MONSIVÁIS, Miranda Elizabeth; GALLARDO HEREDIA, Marisol; GARCÍA LOBATO, Marco Antonio; MALDONADO, Yadira Guadalupe.

TECNOLOGÍA ULTRASÓNICA PARA INCREMENTAR LA EFICIENCIA EN LA RECUPERACIÓN DE MINERALES: SÍNTESIS DE AVANCES RECIENTES 143
ULTRASONIC TECHNOLOGY TO INCREASE MINERAL RECOVERY EFFICIENCY: A SYNTHESIS OF RECENT ADVANCES

MORONES SILLAS, Jesús Alberto; LÓPEZ SAUCEDO, Felipe De Jesús; CARRILLO PEDROZA, Francisco Raúl.

EVALUACIÓN DEL ESTADO ACTUAL DEL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN LA REGIÓN SURESTE DE COAHUILA 164
EVALUATION OF THE CURRENT STATE OF DOMESTIC WASTEWATER TREATMENT IN THE SOUTHEASTERN REGION OF COAHUILA

RODRÍGUEZ ZÚÑIGA, Diana Patricia; BENAVENTE VALDÉS, Juan Roberto.

REDES METALORGÁNICAS LUMINISCENTES DE ZN(II) COMO AGENTES QUIMIOSENSORES EN LA DETECCIÓN DE PESTICIDAS EN RECURSOS HÍDRICOS 175
LUMINESCENT ZN(II) METALORGANIC FRAMEWORKS AS CHEMOSENSING AGENTS FOR PESTICIDE DETECTION IN WATER RESOURCES

ROSALES VÁZQUEZ, Luis David; MORALES LUCKIE, Raúl Alberto; SÁNCHEZ MENDIETA, Víctor; TÉLLEZ LÓPEZ, Antonio.

DE LA ETNOBOTÁNICA A LA NANOTECNOLOGÍA: ASTERACEAE COMO RECURSO ESTRATÉGICO PARA LA INNOVACIÓN 197
FROM ETHNOBOTANY TO NANOTECHNOLOGY: ASTERACEAE AS A STRATEGIC RESOURCE FOR INNOVATION

GARCÍA CONDE, Karen Berenice; CASTAÑEDA FACIO, Adalí Oliva; VARGAS SEGURA, Alejandra Isabel; SÁENZ GALINDO, Aidé.

UNA REVISIÓN DEL USO DE FIBRAS LIGNOCELULÓSICAS EN LA FABRICACIÓN DE EMPAQUES ALIMENTICIOS 228
A review of the use of lignocellulosic fibers in the manufacture of food packaging

VALENCIA BERMÚDEZ, Susana; JARDÓN MAXIMINO, Nohemí; GUTÍERREZ NAVA, Manuel.

ARTÍCULOS DE DIVULGACIÓN

ENERGÍA EÓLICA Y AEROGENERADORES: LA REVOLUCIÓN VERDE IMPULSADA POR EL VIENTO 242
WIND ENERGY AND WIND TURBINES: THE GREEN REVOLUTION DRIVEN BY WIND

ZÚÑIGA AVILÉS, Dalia; MARTÍNEZ LÓPEZ, Miguel; TÉLLEZ LÓPEZ, Antonio

NANOPARTÍCULAS DE SELENIO EN LA BIOMEDICINA: SÍNTESIS, PROPIEDADES Y APLICACIONES TERAPÉUTICAS. 257
SELENIUM NANOPARTICLES IN BIOMEDICINE: SYNTHESIS, PROPERTIES AND THERAPEUTIC APPLICATIONS

MORENO RODRÍGUEZ, Estefany Arisbeth; MÚZQUIZ RAMOS, Elia Martha; LÓPEZ DE LA PEÑA, Haydeé Yajaira; LÓPEZ BADILLO, Claudia Magdalena.

INFLUENCIA DE LOS SUPERPLASTIFICANTES SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CEMENTO PORTLAND COMPUESTO 273
INFLUENCE OF SUPERPLASTICIZERS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF PORTLAND COMPOSITE CEMENT

MARTÍNEZ GUTIÉRREZ, Myriam Itzel; GALLARDO HEREDIA, Marisol; LÓPEZ BADILLO, Claudia Magdalena; CRUZ ARGÜELLO, Julio César; MÚZQUIZ RAMOS, Elia Martha.

PARRAS: AGUA, VINO Y CIVILIZACIÓN EN UN OASIS DEL NORTE DE MÉXICO 286
PARRAS: WATER, WINE AND CIVILIZATION IN AN OASIS OF NORTHERN MEXICO

PERALES HUERTA, Adolfo; SANDOVAL CORTÉS, José; LOREDO TREVIÑO, Araceli; GOVEA SALAS, Mayela; GOMES ARAÚJO, Rafael.

DE LA BIOMASA AL BIOCARBÓN: MATERIALES SOSTENIBLES PARA SU INCORPORACIÓN EN ELASTÓMEROS 305
FROM BIOMASS TO BIOCARBON: SUSTAINABLE MATERIALS FOR INCORPORATION INTO ELASTOMERS

Puente Medellín, Miguel Angel; Castañeda Facio, Adalí Oliva; Sáenz Galindo, Aidé; Díaz Elizondo, José Alejandro; Díaz de León Gómez, Ramón Enrique.

Cereales y bebidas fermentadas como un vehículo de funcionalidad y transporte de nutrientes 318
Cereals and fermented beverages as vehicles for functionality and nutrient delivery

Sánchez Flores, Citlali; Rodríguez Herrera, Raúl; Loredo Treviño, Araceli; Torres Maravilla, Edgar; Veana Hernández, Fabiola; Flores Gallegos, Adriana Carolina

La cooperativa de casas baratas "Pablo Iglesias": vivienda, ciudad y exilio como institución urbana 313
The "Pablo Iglesias" cheap housing cooperative: housing, city and exile as an urban institution

Rosales Mendoza, José Manuel.

¿Sabes lo que hay detrás de tu taza de café? El costo ambiental invisible del café 342
Do you know what's behind your cup of coffee? The hidden environmental cost of coffee

Ortiz Morelos, Diana Paola; Chávez González, Mónica Lizeth; Aguilar González, Cristóbal Noé; Martínez Hernández, José Luis; Luna Sánchez, Karla Alejandra.

Del té fermentado al biomaterial del futuro: la celulosa escondida en la kombucha 353
From fermented tea to the biomaterial of the future: the cellulose hidden in kombucha

Chantre López, Adriana Rocío; Flores Gallegos, Adriana Carolina; Rodríguez Herrera, Raúl; Ilina, Anna; Esparza González, Sandra Cecilia; Roa Acosta, Diego Fernando; Ramos González, Rodolfo.

SCOBY: del cultivo simbiótico a los alimentos funcionales y los materiales avanzados 365

SCOBY: FROM SYMBIOTIC CULTURE TO FUNCTIONAL FOODS AND ADVANCED MATERIALS

SANTIAGO SANTIAGO, Rosa María; MICHEL MICHEL, Mariela Ramona; RODRÍGUEZ HERRERA, Raúl; RAMOS GONZÁLEZ, Rodolfo; GOVEA SALAS, Mayela; AGUILAR ZÁRATE, Pedro; FLORES GALLEGOS, Adriana Carolina.

HIDROGELES: MATERIALES INTELIGENTES QUE ALMACENAN AGUA Y TRANSFORMAN LA AGRICULTURA 374
HYDROGELS: SMART MATERIALS THAT STORE WATER AND TRANSFORM AGRICULTURE

MELÉNDEZ ORTIZ, Héctor Iván; SÁNCHEZ OROZCO, Jorge Luis; BETANCOURT GALINDO, Rebeca; PUENTE URBINA, Bertha Alicia; VERA REYES, Ileana.

DEL CONDUCTOR AL ALGORITMO: OPORTUNIDADES Y DESAFÍOS DE LOS VEHÍCULOS AUTÓNOMOS 384
FROM DRIVER TO ALGORITHM: OPPORTUNITIES AND CHALLENGES OF AUTONOMOUS VEHICLES

NÚÑEZ ESPINOZA, Gabriela Sugeyli; ALVARADO QUIÑONES, Martha; GALLARDO ESPINOZA, Ricardo; TORRES RODRÍGUEZ, Alma Rosa.

DEPRESIÓN Y ENVEJECIMIENTO EN EL NORESTE DE MÉXICO: UNA PERSPECTIVA SOCIAL PARA EL ADULTO MAYOR Y SU ENTORNO 398
DEPRESSION AND AGING IN NORTHEASTERN MEXICO: A SOCIAL PERSPECTIVE FOR OLDER ADULTS AND THEIR ENVIRONMENT

ESPINOZA, José Carlos; BRIONES, Diego Armando; ESPINOSA FUERTE, Estefanía.

INVESTIGACIÓN

PRÁCTICAS ABUSIVAS EN EL ECOSISTEMA DIGITAL: LA VULNERABILIDAD DEL CONSENTIMIENTO FRENTE A LAS PLATAFORMAS TRANSNACIONALES

PRACTICES IN THE DIGITAL ECOSYSTEM: THE VULNERABILITY OF CONSENT AGAINST TRANSNATIONAL PLATFORMS

GAYTÁN ROMÁN, José de Jesús

Facultad de Derecho, Universidad Autónoma de Coahuila. Torreón, Coahuila, México.

RESUMEN

La presente investigación disecciona la vulnerabilidad estructural que oprime al consumidor mexicano frente al poderío de las plataformas digitales transnacionales. El objetivo rector consiste en describir las afectaciones jurídicas derivadas de una voraz asimetría informativa. Se evalúa con rigor la ineficacia material de los mecanismos de responsabilidad amparados por la Ley Federal de Protección de Datos Personales en Posesión de los Particulares (LFPDPPP). Para lograrlo, la metodología se cimentó en un diseño mixto explicativo secuencial (CUAL-cuan). Durante la primera fase, se realizó un análisis documental crítico-hermenéutico. La normativa nacional fue sometida a un escrutinio comparativo con los estándares garantistas del Reglamento General de Protección de Datos (RGPD) europeo. Posteriormente, la vertiente cuantitativa midió empíricamente tres barreras que debilitan el "consentimiento informado" en los contratos de adhesión digitales. Utilizando una muestra por conveniencia de los quince consorcios tecnológicos con mayor penetración comercial ($N=15$), se midieron la extensión absoluta, la fragmentación referencial y la legibilidad mediante el índice Flesch-Szigriszt. Los hallazgos revelaron un escenario insostenible. El usuario medio se enfrenta a volúmenes textuales que superan las cinco mil palabras, redactados con una sintaxis clasificada como "algo difícil" y plagados de hipervínculos dispersos. Tales estipulaciones vuelven materialmente imposible la asimilación humana de las cláusulas. El consentimiento expreso resulta una ficción desvirtuada por tácticas deliberadas de saturación cognitiva. A su vez, el esquema sancionatorio exhibe una nula fuerza disuasoria frente a entidades globales y opera bajo la desgastada lógica de la responsabilidad subjetiva. Como solución dogmática ante esta falla estructural innegable, la investigación concluye proponiendo la adopción imperativa de la responsabilidad civil objetiva por riesgo creado frente a la opacidad

Correspondencia
gaytan-j@uadec.edu.mx
https://orcid.org/0009-0002-4664-7996
Fecha de recepción
11 de noviembre de 2025.
Fecha de aceptación
10 de junio de 2026.

Este artículo fue sometido a revisión por pares doble ciego

algorítmica. Asimismo, se exige dotar de alcance extraterritorial a la jurisdicción mediante la integración del criterio de direccionamiento de servicios (*targeting*).

Palabras clave: protección de datos; asimetría de poder; prácticas abusivas; responsabilidad objetiva; contratos de adhesión.

ABSTRACT

This research dissects the structural vulnerability that oppresses the Mexican consumer in the face of the might of transnational digital platforms. The primary objective is to describe the legal impacts arising from a voracious informational asymmetry. The material ineffectiveness of the liability mechanisms protected by the Federal Law on Protection of Personal Data Held by Private Parties (LFPDPPP) is rigorously evaluated. To achieve this, the methodology was built upon an explanatory sequential mixed-methods design (QUAL-quan). During the initial phase, a critical-hermeneutical documentary analysis was executed. National regulations were subjected to comparative scrutiny against the protective standards of the European General Data Protection Regulation (GDPR). Subsequently, the quantitative strand empirically examined three barriers that undermine "informed consent" in digital adhesion contracts. Utilizing a convenience sample of the fifteen tech consortia with the highest commercial penetration ($N=15$), absolute length, referential fragmentation, and readability were measured through the application of the Flesch-Szigriszt index. The findings revealed an unsustainable scenario. The average user encounters text volumes exceeding five thousand words, drafted in a syntax classified as "somewhat difficult" and plagued by scattered hyperlinks. Such stipulations make human assimilation of the clauses materially impossible. Express consent turns out to be a fiction distorted by deliberate tactics of cognitive saturation. Furthermore, the sanctioning scheme exerts no deterrent effect on global entities, operating under the worn-out logic of subjective liability. As a dogmatic solution to this undeniable structural failure, the research concludes by proposing the imperative adoption of objective civil liability for created risk in the face of algorithmic opacity. Likewise, it requires extending the jurisdiction's extraterritorial scope by integrating the targeting criterion.

Keywords: *data protection; power asymmetry; abusive practices; objective liability; adhesion contracts.*

INTRODUCCIÓN

Para operar legalmente dentro de la jurisdicción nacional, la normatividad impone condiciones inexcusables. La Ley Federal de Protección de Datos Personales en Posesión de los Particulares exige la manifestación de voluntad del titular (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2010). Lejos de imponerse coactivamente, las plataformas transnacionales condicionan la prestación de sus servicios a la aceptación de extensos términos y condiciones. Para poder usarse, dichas plataformas requieren que la persona marque una casilla de verificación, otorgando así su consentimiento expreso. Surgen, sin embargo, cuestionamientos imperativos sobre la validez y la eficacia material de este acto volitivo.

La doctrina contemporánea documenta ampliamente la "paradoja de la privacidad" (Barth & de Jong, 2017), un fenómeno empírico en el que los cibernautas exponen incesantemente su información a pesar de externar una profunda preocupación por su resguardo. Esta disonancia cognitiva no se debe exclusivamente a la negligencia individual del internauta. Emana de un diseño contractual rapaz. Los contratos de adhesión digitales desbordan deliberadamente las capacidades cognitivas del consumidor promedio, instituyendo cláusulas contractuales abusivas bajo la falaz apariencia de legalidad y transparencia. Frente a una saturación sistemática, el clic de aceptación se convierte en un ritual ciego, despojado de genuina libertad electiva.

El objetivo del presente trabajo radica en analizar la ineficacia fáctica del ordenamiento jurídico mexicano para responsabilizar a corporaciones transnacionales por prácticas abusivas en el tratamiento de datos personales. Se analizará la insuficiencia de las garantías secundarias institucionales. Al amparo del Código Civil Federal (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 1928), se explorará el tránsito impostergable de una responsabilidad subjetiva caduca probada (Art. 1910) hacia una responsabilidad civil objetiva, fundada en el riesgo latente que detona la opacidad algorítmica (Art. 1913). Finalmente, se expondrá la imperiosa

necesidad de incorporar el criterio de targeting —entendido como la aplicación extraterritorial de la ley a corporaciones que dirigen u orientan deliberadamente sus servicios hacia consumidores nacionales— para someter materialmente a las entidades foráneas a la soberanía jurisdiccional mexicana.

La complejidad multidimensional del fenómeno exige una aproximación metodológica de doble espectro. Consecuentemente, el estudio se estructura bajo un diseño mixto explicativo secuencial (CUAL-cuan), cimentado en la premisa irrenunciable de que toda deconstrucción dogmática debe anclarse en evidencia empírica tangible e irrefutable.

FASE CUALITATIVA

Se desplegó un diseño de investigación jurídico-documental con un corte crítico-hermenéutico. La unidad de análisis abarcó el núcleo normativo primario: la Ley Federal de Protección de Datos Personales en Posesión de los Particulares (LFPDPPP) y el Código Civil Federal (CCF) de México, contrastándolos analíticamente con las disposiciones del Reglamento General de Protección de Datos (RGPD) emitido por el Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea (2016). A nivel jurisprudencial, la disección recayó sobre los agudos razonamientos esgrimidos en la Acción de Inconstitucionalidad 82/2021 del Pleno de la Suprema Corte de Justicia de la Nación (2022), relativa al fallido Padrón Nacional de Usuarios de Telefonía Móvil (PANAUT), y se utilizó como parámetro estricto de control de constitucionalidad a fortiori.

FASE CUANTITATIVA

Para evidenciar empíricamente la nulidad material del consentimiento expreso ante los tribunales, se diseñó un análisis de contenido transversal y no reactivo. La población objetivo radicó en las "políticas de privacidad" y los "términos de servicio" de las corporaciones tecnológicas de mayor penetración y dominio en el territorio mexicano. Se extrajo una muestra por conveniencia de quince casos paradigmáticos ($N=15 $), que abarcaban titanes de los sectores de redes sociales, comercio electrónico y plataformas de entretenimiento a la carta.

La codificación estructuró tres variables independientes, cuyo propósito singular fue medir objetivamente la carga cognitiva exigida al usuario medio:

- Extensión (V1): Cuantificación absoluta del número de palabras.

- Legibilidad (V2): Aplicación de la fórmula de legibilidad de Flesch-Szigriszt, validada métricamente para el idioma español (Szigriszt Pazos, 2001), que arroja un índice numérico en el que valores inferiores indican una barrera de dificultad sintáctica y semántica más alta.
- Complejidad referencial (V3): Conteo estricto de hipervínculos activos que redirigen a normativas accesorias o complementarias, diseminando maliciosamente la integralidad del contrato maestro.

DESARROLLO Y DISCUSIÓN

ARQUITECTURA DEL CONSENTIMIENTO: RIGOR FORMAL FRENTE A LA ASIMETRÍA MATERIAL

El análisis normativo de los artículos 7 y 8 de la LFPDPPP revela que el sistema jurídico mexicano se articula en torno a la exigencia de consentimiento expreso para el tratamiento de datos personales, el cual se verifica mediante la aceptación explícita del usuario al marcar la casilla de verificación en las plataformas. Sin embargo, esta estructura, aparentemente garantista, colapsa ante la realidad operativa del ecosistema digital. Los resultados del análisis cuantitativo de los quince casos paradigmáticos indican que el usuario promedio redacta 5,070 palabras por documento. Sumado a una complejidad lingüística situada en el rango de "algo difícil" (promedio de Flesch de 53.18) —que exige niveles de instrucción universitaria para su adecuada comprensión—, el consentimiento se convierte en un acto volitivo desprovisto de información real.

Esta saturación cognitiva no constituye un error técnico, sino una estrategia deliberada que configura cláusulas contractuales abusivas. El problema jurídico central no es la inexistencia de un consentimiento expreso, sino la inoperancia de este bajo esquemas de adhesión que impiden la autodeterminación informativa. Por tanto, la calificación de "contratos fraudulentos" debe transitar hacia la noción técnica de "cláusulas contractuales abusivas", entendidas como aquellas que, en contra de la buena fe, causan un desequilibrio sustancial en los derechos y obligaciones de las partes en perjuicio del consumidor.

ASIMETRÍA ALGORÍTMICA Y LA BARRERA DE LA CULPA EN LA RESPONSABILIDAD CIVIL

La determinación del daño moral derivado de la vulneración de datos enfrenta obstáculos probatorios insuperables bajo el régimen de responsabilidad subjetiva previsto en el Artículo 1910 del Código Civil Federal. El usuario se encuentra en la imposibilidad de acreditar la culpa o la negligencia específica del prestador de servicios en el diseño de un algoritmo opaco. Para superar esta barrera, la dogmática jurídica debe avanzar hacia la aplicación del Artículo 1913 del mismo ordenamiento, que regula la responsabilidad por el uso de mecanismos o instrumentos peligrosos.

La perfilación algorítmica y la manipulación del comportamiento deben ser interpretadas por la judicatura como actividades de riesgo creado, dada la naturaleza intrínsecamente opaca y el potencial lesivo de los sistemas de inteligencia artificial utilizados por las plataformas. Al tratarse de una actividad riesgosa por definición, quien lucra con el manejo masivo de datos debe responder por los daños que genere, independientemente de la prueba de su culpa, invirtiendo así la carga de la prueba en favor del titular vulnerado.

EFICACIA SANCIONADORA Y DISUASIÓN ECONÓMICA: UN ANÁLISIS COMPARATIVO

El vértice administrativo de la LFPDPPP, gestionado por el INAI, enfrenta severas limitaciones en su eficacia. Mientras que el INAI ha impuesto multas que, si bien son históricas a nivel nacional (por ejemplo, 60.6 millones de pesos en el caso Cambridge Analytica), resultan financieramente irrelevantes para corporaciones de alcance global, el modelo sancionatorio estadounidense refleja una capacidad disuasoria cualitativamente superior. A modo de contraste, la Federal Trade Commission (FTC) impuso a Facebook una sanción de 5 mil millones de dólares por prácticas similares. Esta disparidad evidencia que el esquema mexicano opera actualmente como un "costo operativo" aceptable para las plataformas, y no como una garantía secundaria eficaz que disuada la reincidencia en el uso indebido de la información.

JURISDICCIÓN DIFUSA Y EL CRITERIO DE EXTRATERRITORIALIDAD (*TARGETING*)

La eficacia del marco jurídico se ve mermada por la ambigüedad de su alcance territorial frente a plataformas que operan a nivel global. Para mitigar

este vacío legal, resulta imperativa la adopción del criterio de targeting o direccionamiento de servicios, técnica que otorga alcance extraterritorial a la norma cuando una entidad, independientemente de su lugar de establecimiento, orienta deliberadamente sus servicios hacia los consumidores nacionales. Esta figura permitiría que la autoridad mexicana sometiera a escrutinio efectivo a las plataformas que, aunque carecen de domicilio fiscal en el país, lucran con el tratamiento de datos de usuarios residentes en México, homologando nuestra práctica a los estándares del RGPD europeo.

ANATOMÍA COMPARADA DEL CONSENTIMIENTO: EL ABISMO ENTRE LA LFPDPPP Y EL RGPD

El contraste normativo desnuda la inoperancia dogmática del marco legislativo mexicano. Mientras la LFPDPPP petrifica la manifestación de la voluntad en una dicotomía binaria que acorrala al usuario entre la aceptación total y la exclusión del servicio (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2010), el paradigma transatlántico evolucionó hacia la protección material. El Reglamento General de Protección de Datos instauró un rigor analítico ineludible, exigiendo que el consentimiento sea libre, específico, informado e inequívoco mediante una clara acción afirmativa (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2016). La normativa europea prohíbe taxativamente las casillas premarcadas y el condicionamiento del contrato a la entrega de datos innecesarios. En México, esta granularidad no existe. La Suprema Corte de Justicia de la Nación (2022) ya delineó un precedente severo sobre la recolección desproporcionada de información en la Acción de Inconstitucionalidad 82/2021; si el máximo tribunal determinó que el Estado no puede coaccionar la entrega de datos biométricos bajo la premisa de seguridad nacional, resulta un contrasentido jurídico que entidades privadas transnacionales lo hagan impunemente bajo el escudo del lucro mercantil. El consentimiento en México, atrapado en una redacción legalista de 2010, claudica ante la arquitectura predatoria de las interfaces contemporáneas.

TAXONOMÍA DE LA OPACIDAD: DESPLIEGUE EMPÍRICO DE LAS PLATAFORMAS

La disección de la matriz cuantitativa (tabla 1) revela patrones corporativos altamente diferenciados que evidencian un diseño deliberado del laberinto cognitivo. Por un lado, los titanes del software y el comercio electrónico

apuestan por la asfixia volumétrica. Microsoft encabeza el espectro con un documento titánico de 15,502 palabras, seguido de cerca por Coppel con 11,180. Pretender que un consumidor asimile un contrato equiparable en extensión a una tesina universitaria antes de instalar un sistema operativo carece de toda lógica fáctica. Por otro lado, entidades basadas en la segmentación algorítmica para la venta de publicidad, como Google y Meta, emplean la táctica de fragmentación referencial. Al incrustar 88 y 39 hipervínculos activos respectivamente, dinamitan la unidad del documento maestro. El usuario es arrojado a un abismo de políticas accesorias, anexos de privacidad y adendas territoriales, lo que diluye la posibilidad humana de rastrear el destino final de sus metadatos. Finalmente, el sector de la economía colaborativa y el *streaming* (DiDi, Uber, Netflix) presenta textos considerablemente más breves, pero la trampa subyace en su métrica Flesch-Szigriszt (Szigriszt Pazos, 2001). Ninguno de los quince casos analizados logra descender a un rango de "Lectura Normal". Todos orbitan entre lo "Algo Difícil" y lo "Difícil", erigiendo una barrera técnica y semántica que convierte el acto de aceptar en un salto al vacío.

ALGORITMOS COMO MECANISMOS PELIGROSOS: LA DOGMÁTICA DEL ARTÍCULO 1913 DEL CCF

Trasladar la responsabilidad civil objetiva al ecosistema digital exige audacia judicial y una reinterpretación teleológica de la norma. Históricamente, el Artículo 1913 del Código Civil Federal (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 1928) fue concebido para resarcir daños ocasionados por artefactos tangibles cuya velocidad, naturaleza explosiva o energía eléctrica representaran un riesgo inherente para la sociedad. Hoy, el concepto de "mecanismo peligroso" debe desprenderse de su envoltura física. Un algoritmo opaco, diseñado para la extracción masiva, el cruce psicográfico de vulnerabilidades y la perfilación predictiva, constituye una herramienta de alto riesgo estructural. La asimetría es insalvable. El titular de los datos jamás tendrá acceso al código fuente de la plataforma ni comprenderá la ruta automatizada que siguió su información para causar un daño moral o patrimonial. Exigirle que pruebe la "culpa" o la negligencia procedimental de la corporación bajo el régimen subjetivo tradicional es condenarlo a una *probatio diabolica*. Al catalogar la perfilación transnacional como una actividad riesgosa por definición, el ordenamiento jurídico mexicano facultaría a los tribunales para revertir la carga probatoria, obligando a la

empresa a indemnizar el daño producido por el solo hecho de lucrar con un sistema de inteligencia artificial cuyo control escapa al entendimiento público.

Tabla 1. Matriz de Resultados Cuantitativos (N=15)

#	Empresa (Caso-Tipo)	V1: Extensión (Palabras)	V2: Legibilidad (Flesch)	Rango (Dificultad)	V3: Complejidad (Links)
1	Microsoft	15,502	59.25	algo difícil	61
2	Coppel	11,180	57.73	algo difícil	23
3	Spotify	6,512	54.03	algo difícil	27
4	Rappi	6,131	56.36	algo difícil	3
5	TikTok	5,404	51.22	algo difícil	15
6	Amazon	4,851	49.54	difícil	18
7	Meta (Facebook)	4,197	50.94	algo difícil	39
8	YouTube	4,183	58.41	algo difícil	32
9	Google	3,410	50.37	algo difícil	88
10	Uber	3,353	55.01	algo difícil	5
11	Netflix	3,015	54.98	algo difícil	9
12	X (Twitter)	2,730	57.39	algo difícil	20
13	Apple	2,028	53.07	algo difícil	6
14	Disney+	2,036	44.56	difícil	21
15	DiDi	1,529	44.90	difícil	2
	Promedios:	5,070.73	53.18	algo difícil	24.60

CONCLUSIONES

La presente investigación ha demostrado, mediante un diseño metodológico mixto, que el modelo de "consentimiento informado" que rige la economía digital en México constituye una ficción jurídica, teórica y material. La rigidez del sistema, al aferrarse a una interpretación formalista del consentimiento expreso, desatiende la realidad fáctica de la asimetría de poder entre el consumidor y los titanes tecnológicos.

Se concluye que la ineficacia del marco jurídico no radica en la ausencia de normas, sino en su diseño estructural. Los hallazgos confirman tres falencias determinantes:

Ineficacia del consentimiento: el acto de aceptación es materialmente imposible de otorgar de forma informada cuando el consumidor enfrenta barreras de extensión, legibilidad técnica y fragmentación referencial que exceden las capacidades cognitivas del ciudadano promedio.

Insuficiencia sancionadora: el esquema de multas actual carece de fuerza disuasoria frente a corporaciones transnacionales y opera como un costo operativo mínimo en comparación con los beneficios derivados de la explotación de datos.

Barreras probatorias: el sistema de responsabilidad subjetiva impone al titular una carga probatoria de "culpa", lo que deriva en una *probatio diabolica*, dada la opacidad intrínseca de los algoritmos utilizados para la perfilación.

La protección efectiva de la autodeterminación informativa requiere una transformación paradigmática. En primer lugar, es indispensable transitar hacia un modelo de responsabilidad civil objetiva, fundada en el riesgo creado, desplazando la carga de la prueba a quienes lucran con la opacidad algorítmica. En segundo lugar, se requiere la adopción explícita del criterio de targeting en la LFPDPPP, lo cual permitirá otorgar alcance extraterritorial a la ley y someter a las plataformas transnacionales a la soberanía jurisdiccional mexicana.

Finalmente, esta investigación insta a abandonar el paradigma del consentimiento individual como única vía de protección. Se propone la implementación de una responsabilidad fiduciaria digital, en la que las plataformas, al gestionar activos personales, asuman obligaciones de cuidado que prohíban usos perjudiciales, independientemente de lo pactado en contratos de adhesión ilegibles. Solo mediante estas reformas estructurales se podrá cerrar la brecha de eficacia que actualmente permite la explotación desmedida de la información en el ecosistema digital.

REFERENCIAS

Barth, S., & de Jong, M. D. T. (2017). The privacy paradox – Investigating discrepancies between expressed privacy concerns and actual online behavior – A systematic literature review. *Telematics and Informatics*, 34(7), 1038–1058. https://doi.org/10.1016/j.tele.2017.04.013

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (1928). *Código Civil Federal*. https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/2_110121.pdf

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2010). *Ley Federal de Protección de Datos Personales en Posesión de los Particulares*. https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LFPDPPP.pdf

Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2016). *Reglamento (UE) 2016/679 relativo a la protección de las personas físicas en lo que respecta al tratamiento de datos personales y a la libre circulación de estos datos*. http://data.europa.eu/eli/reg/2016/679/oj

Suprema Corte de Justicia de la Nación. (2022). *Sentencia dictada por el Tribunal Pleno de la Suprema Corte de Justicia de la Nación en la Acción de Inconstitucionalidad 82/2021 y su acumulada 86/2021*. Diario Oficial de la Federación. https://sidof.segob.gob.mx/notas/5673910

Szigriszt Pazos, F. (2001). *Sistemas predictivos de legibilidad del mensaje escrito: Fórmula de perspicuidad* [Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid]. Docta Complutense. https://docta.ucm.es/entities/publication/72b6bb4b-0773-4ca2-84f6-748c83076a ce

INTERFAZ VISUAL-AUDITIVA PARA PERSONAS DÉBILES VISUALES

VISUAL-AUDITORY INTERFACE FOR PEOPLE WITH VISUAL IMPAIRMENTS

PÉREZ CASILLAS, Alan Refugio

ZAVALA LUNA, Guadalupe

SANDOVAL GÓMEZ, María Fernanda

GÓMEZ CASAS, Josué

TORO ARCILA, Carlos Alberto

OBREGÓN FLORES, Jonathan Sebastián

ORTIZ RAMOS, Daniela Estefanía

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Coahuila. Arteaga, Coahuila, México.

RESUMEN

La interpretación automática de escenas visuales complejas y dinámicas, como las de un supermercado, representa una frontera significativa para la visión por computadora. La detección robusta de una gran diversidad de objetos y la extracción precisa de información contextual como los precios, en entornos no controlados con iluminación variable y oclusiones, siguen siendo un desafío científico fundamental. Esta limitación impacta directamente el desarrollo de tecnologías asistenciales efectivas para millones de personas con discapacidad visual que enfrentan barreras en tareas cotidianas como las compras autónomas. Este trabajo presenta el desarrollo de un marco computacional novedoso para la interpretación visual-auditiva. La metodología se basa en un modelo de aprendizaje profundo que integra una arquitectura de detección de objetos (YOLOv8, You only look once, versión 8) con un sistema de reconocimiento óptico de caracteres (OCR, por sus siglas en inglés), ambos optimizados para operar eficientemente en un dispositivo móvil con un diseño de lentes. Para entrenar y validar el sistema, se ha creado un nuevo conjunto de datos con miles de imágenes capturadas en supermercados reales, anotadas con cajas delimitadoras para productos y etiquetas de precios. Como resultado principal, nuestro modelo demuestra una mejora significativa en la precisión de detección simultánea de objetos en el contexto de los supermercados en comparación con los enfoques estándar, manteniendo un alto rendimiento en condiciones de baja luminosidad (menores a 450 luxes) y vistas parciales, se alcanzó una confiabilidad de hasta el 80 % en la detección de productos de muestra, manteniendo una latencia operativa mínima. En conclusión, este trabajo no solo ofrece una solución tecnológica viable, sino que también genera conocimiento sobre la adaptación de modelos de inteligencia artificial a entornos no estructurados, sentando las bases para una nueva generación de herramientas asistenciales de bajo costo que mejoran sustancialmente la autonomía e inclusión de las personas con debilidad visual.

Palabras clave: visión por computadora; aprendizaje profundo; debilidad visual; tecnología asistencial.

Correspondencia
jogomezc@uadec.edu.mx
https://orcid.org/0000-0002-7696-0433

Fecha de recepción
5 de febrero de 2026.
Fecha de aceptación
14 de junio de 2026.

Este artículo fue sometido a revisión por pares doble ciego

ABSTRACT

The automatic interpretation of complex and dynamic visual scenes, such as those found in a supermarket, represents a significant frontier in computer vision. The robust detection of a wide diversity of objects and the precise extraction of contextual information such as prices, in uncontrolled environments with variable lighting and occlusions, remains a fundamental scientific challenge. This limitation directly impacts the development of effective assistive technologies for millions of people with visual impairments who face barriers in everyday tasks such as independent shopping.

This work presents the development of a novel computational framework for visual-auditory interpretation. The methodology is based on a deep learning model that integrates an object detection architecture (YOLOv8) with an optical character recognition (OCR) system, both optimized to operate efficiently on a mobile device with a lens-based design. To train and validate the system, a new dataset was created with thousands of images captured in real supermarkets, annotated with bounding boxes for products and price tags.

As a main result, our model demonstrates a significant improvement in the simultaneous detection accuracy of objects within supermarket contexts compared to standard approaches, while maintaining high performance under low-light conditions and partial views. A reliability of up to 80 % was achieved in the detection of sample products, while maintaining minimal operational latency.

In conclusion, this work not only offers a viable technological solution, but also generates knowledge on adapting artificial intelligence models to unstructured environments, laying the foundation for a new generation of low-cost assistive tools that substantially enhance the autonomy and inclusion of people with visual impairments.

Keywords*: computer vision, deep learning; visual impairments; assistive technologies.*

INTRODUCCIÓN

La magnitud del desafío de la discapacidad visual, tanto a nivel global como nacional, es apremiante. Según la OMS (2023), más de 2,200 millones de personas viven con deterioro visual, con acceso limitado a soluciones. En México, el INEGI (2020) reporta al menos 2,691,000 personas con deficiencia visual, que representan el 2.14 % de la población mexicana total y enfrentan barreras significativas en su vida diaria. A nivel local (Coahuila y Saltillo), las cifras también son considerables (57,381 y 12,196 personas respectivamente), subrayando la necesidad urgente de intervenciones efectivas. Una de las barreras cotidianas más relevantes es la dificultad para realizar tareas esenciales, como las compras en supermercados, de forma autónoma. Este proyecto aborda directamente esta problemática social al investigar y desarrollar los fundamentos de una herramienta tecnológica asistencial (la interfaz visual-auditiva basada en el marco computacional propuesto). Al permitir la identificación de productos y precios mediante procesamiento local en un dispositivo potencialmente accesible (basado en hardware como la Raspberry Pi 4), se busca ofrecer una solución práctica para mejorar la autonomía y calidad de vida de este sector poblacional.

La búsqueda de soluciones tecnológicas para asistir a personas con debilidad visual en sus actividades cotidianas ha explorado diversas vías. Enfoques iniciales se basaron en tecnologías como RFID (indicadores de radiofrecuencia por sus siglas en inglés) para la identificación de objetos sin contacto, acopladas a sistemas de reproducción de audio para describir el objeto detectado, facilitando tareas básicas (Fernández, 2012). Si bien útiles para objetos pre-etiquetados, estas soluciones presentan limitaciones intrínsecas en entornos dinámicos y no controlados como un supermercado, donde la mayoría de los productos no cuentan con etiquetas RFID y el objetivo es reconocer visualmente una amplia gama de artículos.

Posteriormente, la visión por computadora emergió como un campo prometedor. Propuestas tempranas incluyeron el uso de realidad aumentada en dispositivos tipo lentes ("AR GLASS") para detectar objetos mediante una cámara web y ofrecer retroalimentación auditiva (Castaño Rivera et al., 2015). Aunque conceptualmente interesantes, estos sistemas mostraron dificultades significativas en entornos desconocidos, donde la falta de guía sobre dónde enfocar limitaba su usabilidad práctica. Otros enfoques exploraron la visión estereoscópica para obtener información tridimensional del entorno y traducirla a señales hápticas (vibraciones), orientándose más a la detección

de obstáculos y la navegación que al reconocimiento detallado de objetos (Cruz, 2019). Investigaciones más específicas utilizaron visión artificial para tareas concretas como el reconocimiento de billetes, pero a menudo requerían condiciones controladas (uso de un guante de color específico para delimitar el área de interés) y algoritmos de procesamiento de imagen tradicionales (HSV, binarización) que no escalan bien a la complejidad y variabilidad de escenarios como un supermercado (Tamayo Zapata, 2018). De manera similar, sistemas basados en algoritmos como Haar Cascade se enfocaron en la detección de objetos en entornos interiores, pero con limitaciones en la generalización y robustez ante la diversidad de productos comerciales (Guillen Salazar & Bonilla Bonilla, 2021).

El avance reciente más significativo proviene de la integración de inteligencia artificial (IA) y cámaras en dispositivos portables, como los lentes inteligentes desarrollados por Meta en colaboración con Ray-Ban. La primera generación (Meta, 2021) se centró en la captura multimedia para entretenimiento, con capacidades de procesamiento limitadas para tareas asistenciales complejas (Meta, 2021; Iqbal & Campbell, 2022). La segunda generación (2023) representa un salto cualitativo al incorporar cámaras de mayor resolución y asistentes de IA (Meta AI) capaces, según se informa, de realizar reconocimiento de objetos y traducción visual-auditiva (Waisberg et al., 2023).

Por lo tanto, a pesar de los progresos existentes, persiste una brecha significativa en el conocimiento y la tecnología para desarrollar sistemas de interpretación visual-auditiva que sean verdaderamente robustos, eficientes, específicos para la tarea de compra en supermercados y potencialmente de bajo costo. Este proyecto se enfoca en desarrollar y validar un marco computacional basado en visión por computadora y aprendizaje profundo para la interpretación visual robusta y en tiempo real de productos de abarrotes y sus precios en entornos complejos de supermercado, estableciendo los fundamentos metodológicos para sistemas de asistencia visual-auditiva eficientes y accesibles.

METODOLOGÍA

La presente investigación adopta un enfoque metodológico experimental y cuantitativo, fundamentado en los principios de la visión por computadora, el aprendizaje profundo y el procesamiento de señales. Sigue una serie de pasos específicos mostrados en la figura 1 y se basa en el marco teórico de las redes

neuronales convolucionales (CNN, por sus siglas en inglés), el aprendizaje supervisado y los modelos de percepción artificial, con el objetivo de desarrollar y validar un marco computacional robusto para la interpretación visual en tiempo real de entornos complejos, como los supermercados. La estrategia se enfoca en abordar los desafíos científicos inherentes a esta tarea (variabilidad, densidad, integración objeto-texto) y generar conocimiento sobre la efectividad y limitaciones de los enfoques actuales, culminando en la evaluación de un prototipo para asistencia visual.

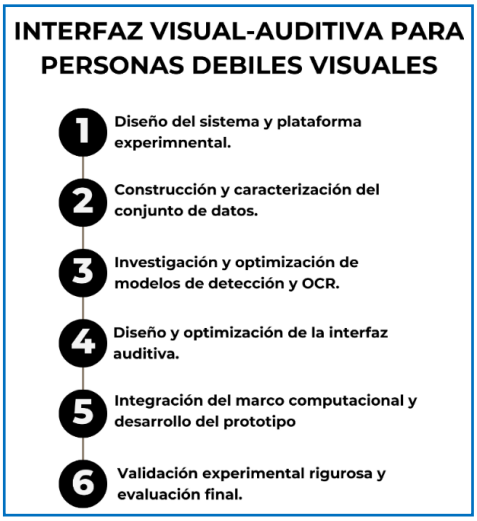


Figura 1. Diagrama de metodología.

DISEÑO DEL SISTEMA Y PLATAFORMA EXPERIMENTAL

Se utilizó una Raspberry Pi 4 modelo B como sistema representativo para la evaluación de rendimiento en el borde (edge computing); la autonomía energética fue provista por una batería portátil recargable de 200000 mAh, completando la configuración de la plataforma experimental para validación. La adquisición de datos visuales se realizó mediante una cámara RGB monocular inalámbrica. La interfaz auditiva se implementará con un módulo de audio, bocinas compactas y/o auriculares inalámbricos.

CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL CONJUNTO DE DATOS

Se creó un conjunto de datos específico y representativo del dominio de los supermercados. Esto implicó la recolección sistemática de imágenes utilizando

4737 imágenes de productos de supermercado (categorías definidas: enlatados, cajas de leche, cajas de cereal y papel sanitario), el dataset se dividió en un 80 % entrenamiento y 20 % validación. Se utilizó la plataforma Roboflow para la gestión, anotación precisa (bounding) y versionado del dataset. Se aplicó un conjunto curado de técnicas de Data Augmentation (geométricas: rotación, escalado, traslación; fotométricas: brillo, contraste, saturación; y potencialmente otras como CutMix, Mosaic) específicamente seleccionadas para simular la variabilidad del entorno real y evaluar su impacto en la robustez y generalización de los modelos entrenados.

INVESTIGACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE MODELOS DE DETECCIÓN Y OCR

Se investigó la adaptación del modelo YOLOv8, que adopta un cabezal Ultralytics dividido sin anclaje, lo que contribuye a una mejor precisión y a un proceso de detección más eficiente en comparación con los enfoques basados en anclaje (Ultralytics YOLOv8), para la tarea específica de detección de objetos (productos) y texto pequeño (precios) en nuestro dataset, asimismo se evaluaron y compararon las métricas arrojadas por el reentrenamiento.

DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE LA INTERFAZ AUDITIVA

Siguiendo los principios de diseño de interfaces auditivas eficaces, se desarrolló el módulo de conversión texto-a-voz utilizando librerías como pyttsx3 o gTTS, evaluando y seleccionando la que ofrezca mejor inteligibilidad y menos latencia en la plataforma Raspberry Pi. Se optimizó el flujo de procesamiento para asegurar que la latencia total desde la captura de imagen hasta la salida auditiva sea consistentemente inferior a 1 segundo, un umbral crítico para la usabilidad en tiempo real. Se considerarán estrategias para presentar la información de forma concisa y no abrumadora.

INTEGRACIÓN DEL MARCO COMPUTACIONAL Y DESARROLLO DEL PROTOTIPO EXPERIMENTAL

Los componentes investigados y optimizados (modelo de detección, estrategia de asociación, interfaz auditiva) se integraron en un marco computacional coherente. Este marco se implementará en la plataforma, constituyendo el prototipo demostrador funcional. Se le realizará una adaptación esencial al modelo para asegurar su funcionamiento en la Raspberry Pi 4.

VALIDACIÓN EXPERIMENTAL RIGUROSA Y EVALUACIÓN FUNCIONAL

Se evaluó la precisión end-to-end (detección+OCR+asociación), latencia y eficiencia en el conjunto de datos de validación final, incluyendo escenarios diseñados específicamente para probar la robustez ante variaciones controladas de iluminación, distancia, ángulo y oclusión.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Hasta el momento se logró la creación de una red neuronal convolucional capaz de identificar y detectar ciertos productos de supermercado (clases: caja de leche, cajas de cereal, enlatados y papel sanitario). Ésta arrojó unas métricas que muestran alrededor de un 80 % de precisión como se muestra en la figura 2.

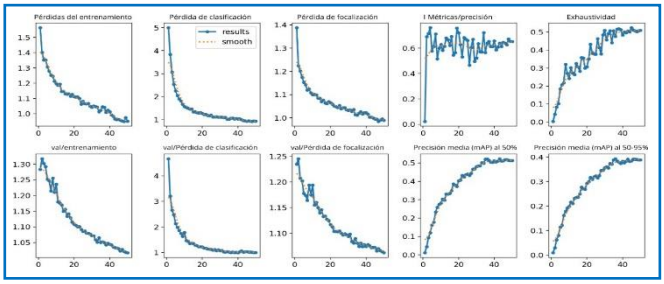


Figura 2. Métricas del reentrenamiento de la red.

Utilizando YOLOv8 comercial, se lograron resultados que arrojaron hasta un 88 % de confiabilidad al momento de la detección e identificación de algunas clases (tazas, botellas, sillas y personas). Estos resultados fueron tomados con una luminosidad de 450 lux a mediodía, mostrados en las figuras 3 y 4.



Figura 3 Detección de las clases "tazas y botellas".



Figura 4. Detección de las clases "personas y sillas".

Del mismo modo, se obtuvieron resultados favorables con la red reentrenada en la cual se logró la identificación y detección de algunos productos de supermercado (cajas de leche, cajas de cereal, enlatados y papel sanitario), como se observa en las figuras 5 y 6.



Figura 5. Detección de la clase "jugo" con la red reentrenada.



Figura 6. Detección de la clase "caja de cereal" con la red reentrenada.

El resultado científico principal de este proyecto fue el desarrollo y la validación de un marco computacional robusto para la interpretación visual en tiempo real (detección de productos y lectura de precios) en entornos complejos y no controlados, como los supermercados, utilizando visión por computadora y aprendizaje profundo.

En conjunto, estos resultados impulsaron el conocimiento en la intersección de la visión por computadora, el aprendizaje profundo y las tecnologías asistenciales, proporcionando metodologías validadas, caracterizaciones de rendimiento y principios de diseño aplicables a otros problemas de percepción artificial en entornos reales y complejos.

Aunque los resultados fueron favorables, la red se tiene que someter a modificaciones, como el aumento de la calidad de las imágenes en el dataset, para aumentar su precisión (menor del 80 %) para lograr alcanzar o superar el porcentaje de confiabilidad del modelo YOLOv8 comercial (arriba del 80 %). Aunado a esto, se tiene que trabajar con la Raspberry para buscar la mejor manera de adaptación del modelo de red neuronal, teniendo en cuenta las limitaciones del hardware, ya que cuenta con poca memoria RAM, una GPU muy limitada y baja capacidad de procesamiento que ofrece este tipo de plataforma.

CONCLUSIONES

Según los resultados obtenidos hasta el momento, se logró una correcta identificación y detección de objetos utilizando Yolo v8 comercial, con un nivel de confiabilidad de hasta el 88 %. El reentrenamiento del modelo con un mayor número de clases específicas de supermercado resultó en una mejora en la capacidad de detección. Sin embargo, este aumento en la complejidad del problema conllevó una disminución en el porcentaje de confianza promedio, un compromiso conocido en el entrenamiento de redes neuronales, por lo que es necesario trabajar en el reentrenamiento de la red, para que pueda llegar o superar el porcentaje de confiabilidad antes obtenido con Yolo v8 comercial, de la mano de las modificaciones a las cuales se está sometiendo la red, se sigue trabajando con las modificaciones en la Raspberry para que la detección se pueda realizar en tiempo real sin tener un desfase de tiempo tan extenso, ya que hasta el momento se ha logrado trabajar con 2 FPS.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Coahuila y al Laboratorio de Automatización de la Facultad de Ingeniería, por el apoyo para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

Castaño, S., Peinado, Y. J. & Carcamona, E. (2013). Coantruccion de un dispositivo de bajo costo como apoyo a personas con discapacidad visual utilizando realidad aumentada, *Ingenieria e Innovacion*, 1(2): 769. DOI: https://doi.org/10.21897/23460466.769

Cruz, S. M. (2019). Desarrollo de prototio para la detección de obstáculos en personas invidentes por medio de visión artificial. Tesis de Maestría en Ciencias con acentuación en Mecatrónica. Universidad Autónoma de Queretaro, Queretaro, Mexico.

Fernández, L. E. O. (2012). Sistema de identificación de objetos para personas invidentes usando la tecnología RFID. *Ingenives*, (8): 38-44.

Guillen Salazar, M. F. & Bonilla Bonilla, T. J. (2021). Diseño e implemetnacion de un prototipo embebido de reconocimiento de objetos por medio de visión artificial como ayuda a personas con deficiendia visual. Tesis de Ingenieria en Electronica y Automatizacion. Escuela Superior Politecnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2020). Estadística de discapacidad visual. [En línea]. Disponible en: https://www.gob.mx/profeco/documentos/ojo-con-tu-salud-visual?state=published#:~:text=Datos%20del%20Censo%20de%20Poblaci%C3%B3n,y%20presbicia)%2C%20catarata%20senil%2C . Fechade consulta: 21 de febrero de 2025.

Iqbal, M. Z. & Campbell, A. G. (2022). Adopting Smart glasses responsibly: potencial benefits, ethical, and privacy conerns whit Ray-Ban Stories. *AI and Ethics*, 3()1: 325-327. DOI: 10.1007/s43681-022-00155-7.

Meta (2021). Ray-Ban and Facebook introduce Ray-Ban Stories, firt- generation Smart glasses. [En línea]. Disponible en: https://tech.facebook.com/real (Fang et al., 2026; Muambo et al., 2024)ity-labs/2021/9/ray-ban-and-facebook-introduce-ray-ban-stories-first-generation-smart-glasses/. Fecha de consulta: 9 de febrero de 2025.

OMS, Organización Mundial de la salud (2023), ceguera y discapacidad visual. [En línea]. Disponible en: https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/blindness-and-visual-impairment#:~:text=Prevalencia,todav%C3%ADa%20no%20se%20ha%20tratado. Fecha de consulta: 16 de febrero de 2025.

Tamayo Zapata, K. J. (2018. Siatema de reconocimiento de billetes para personas con discapacidad visual mediante visión artificial. Tesis de Maestría. Universidad EIA.

Waisberg, E., ONG, J., Masalkhi, M. Zaman, N., Sarker, P., Lee, A. G. & Tavakkoli, A. (2023). Meta Smart glasses-large language models and the future for assistive glasses for individuals whit visión impairments. *Eye*, 38(6): 1036-1038. DOI: 10.1038/s41433-023-02842-z.

SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE SISTEMAS INTELIGENTES BASADOS EN POLI(ÁCIDO METACRÍLICO-CO-ANILINA) CON PERSPECTIVAS DE APLICACIÓN EN REMEDIACIÓN DEL AGUA

SYNTHESIS AND PHYSICOCHEMICAL CHARACTERIZATION OF SMART SYSTEMS BASED ON POLY(METHACRYLIC ACID-CO-ANILINE) WITH PROSPECTS OF APPLICATION IN WATER REMEDIATION

SÁNCHEZ OROZCO, Jorge Luis [1]

HERNÁNDEZ RIVERA, Angélica [2]

ROMERO ZÚÑIGA, Gabriela Yolotzin [1]

SORIA ARGÜELLO, GUSTAVO [3]

PUENTE URBINA, Bertha Alicia [1]

RESUMEN

En este trabajo se reporta la síntesis y caracterización de un copolímero basado en poli(anilina) (poli(ANI)) y poli(ácido metacrílico) (poli(MAA)), con el objetivo de desarrollar un sistema polimérico inteligente con perspectivas de aplicación en la remediación del agua. El sistema poli(MAA-co-ANI) se obtuvo mediante polimerización química *in situ* y se caracterizó mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), espectroscopía ultravioleta-visible (UV-Vis), difracción de rayos X (DRX) y análisis termogravimétrico (TGA). Los resultados de FTIR evidenciaron la presencia de grupos funcionales característicos de ambos componentes, así como posibles interacciones intermoleculares entre grupos amino y carboxílicos. Los espectros UV-Vis mostraron variaciones en las bandas de absorción en función del pH, asociadas a cambios en el estado electrónico del sistema. Asimismo, el análisis de DRX indicó modificaciones en el orden estructural respecto de la poli(ANI) prístina, mientras que los resultados de TGA revelaron variaciones en la estabilidad térmica atribuibles a la copolimerización. En conjunto, estos resultados confirman la obtención de un sistema polimérico con propiedades fisicoquímicas modulables y comportamiento pH-responsivo, lo que permite establecer una base para futuras investigaciones orientadas a evaluar su potencial en aplicaciones de remediación del agua.

Palabras clave: poli(anilina); poli(ácido metacrílico); pH-sensibles.

1. Centro de Investigación en Química Aplicada. Saltillo, Coahuila, México.
2. Departamento de Biotecnología, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila. Saltillo, Coahuila, México.
3. SECIHTI-Centro de Investigación en Química Aplicada. Saltillo, Coahuila, México.

Correspondencia
jorge.sanchez.ps@ciqa.edu.mx
https://orcid.org/0000-0002-3644-3220

Fecha de recepción
14 de febrero de 2026.
Fecha de aceptación
20 de mayo de 2026.

Este artículo fue sometido a revisión por pares doble ciego

ABSTRACT

This work reports the synthesis and characterization of a copolymer based on poly(aniline) (poly(ANI)) and poly(methacrylic acid) (poly(MAA)), with the aim of developing a smart polymer system with potential applications in water remediation. The poly(MAA-co-ANI) system was obtained by in situ chemical polymerization and characterized by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), ultraviolet-visible (UV-Vis) spectroscopy, X-ray diffraction (XRD), and thermogravimetric analysis (TGA). The FTIR results revealed the presence of functional groups characteristic of both components, as well as possible intermolecular interactions between amino and carboxylic groups. The UV -Vis spectra showed pH-dependent variations in the absorption bands, reflecting changes in the electronic state of the system. Furthermore, XRD analysis indicated structural changes compared to the pristine poly(ANI), while TGA results revealed variations in thermal stability attributable to copolymerization. Taken together, these results confirm the development of a polymer system with modulable physicochemical properties and pH-responsive behavior, establishing a foundation for future research to evaluate its potential for water remediation applications.

Keywords: *poly(aniline); poly(methacrylic acid); pH-responsive.*

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la contaminación del agua por sustancias persistentes, como pesticidas, microplásticos, fármacos y colorantes sintéticos, se ha convertido en un problema ambiental y de salud de gran relevancia a nivel mundial. Estos compuestos, derivados principalmente de efluentes industriales, agrícolas, farmacéuticos y domésticos, presentan alta estabilidad química y biológica, lo que impide su degradación natural y dificulta su eliminación mediante métodos convencionales de tratamiento de aguas, como la coagulación, la filtración o la cloración (Fang et al., 2026; Muambo et al., 2024). En este contexto, el desarrollo de materiales funcionales de carácter anfótero representa una estrategia prometedora, ya que permite la interacción con diversas especies iónicas presentes en dichos contaminantes. En particular, los polímeros inteligentes han despertado un creciente interés por

su capacidad de modular sus propiedades en función del entorno y de favorecer interacciones selectivas en medios acuosos.

Entre estos materiales, la poli(ANI) destaca por su facilidad de síntesis, estabilidad química y comportamiento redox reversible, así como por la posibilidad de ajustar sus propiedades ópticas y eléctricas mediante procesos de dopaje y variaciones de pH (Lai et al., 2019; Sharma, Kumar, et al., 2015; Tong et al., 2020; Wang et al., 2022). No obstante, su limitada solubilidad y procesabilidad en medios acuosos restringen su aplicabilidad (Samadi et al., 2023). Por su parte, el poli(MAA) es un polímero pH-sensible con grupos carboxílicos ionizables, lo que le confiere hidrofilicidad y funcionalidad química relevante para aplicaciones ambientales (Sánchez-Orozco et al., 2023, 2024). La conjugación de ambos polímeros permite integrar sus propiedades y obtener materiales cuyo comportamiento puede modularse mediante estímulos externos, particularmente mediante cambios de pH (Samadi et al., 2023).

En este contexto, el presente trabajo aborda la síntesis y la caracterización fisicoquímica de un sistema polimérico inteligente basado en poli(ANI) y poli(MAA) (poli(MAA-co-ANI)), con la finalidad de establecer las bases para futuras investigaciones orientadas a evaluar su desempeño en la interacción con contaminantes emergentes y su posible aplicación en procesos de remediación del agua.

MATERIALES Y MÉTODOS

MATERIALES Y REACTIVOS

Ácido metacrílico (MAA, 99 %), persulfato de amonio (APS, 98 %), N, N'-metilenbisacrilamida (NMBA, 99 %), anilina (ANI, ≥ 99,5 %) y ácido sulfúrico (H_2SO_4, 95-97 %). Los reactivos se utilizaron tal como se recibieron de Sigma-Aldrich, a excepción de la anilina, que se destiló antes de su uso. El agua desionizada se obtuvo mediante un sistema de intercambio iónico con cuatro columnas (Cole-Parmer Instruments).

SÍNTESIS DE POLI(MAA-CO-ANI)

En primer lugar, se sintetizó poli(MAA) mediante polimerización por radicales libres. Para ello, 500 mg de MAA se disolvieron en 15 mL de agua desionizada bajo agitación magnética a 300 rpm. Posteriormente, se agregaron 25 mg de iniciador y de agente de reticulación (APS y NMBA, respectivamente). La mezcla resultante se desgasificó con N_2 durante 20 min y la reacción de polimerización se llevó a cabo a 60 °C durante 24 h. A continuación, el poli(MAA) obtenido se precipitó por centrifugación (12 000 rpm) y se lavó varias veces con agua desionizada bajo agitación vigorosa. Finalmente, el poli(MAA) se secó a 60 °C y se almacenó herméticamente hasta su uso.

Por otro lado, para llevar a cabo la síntesis de poli(MAA-co-ANI), se agregaron 80 mg de poli(MAA) a 20 mL de agua desionizada y se dispersaron mediante un baño de ultrasonido durante 20 min. Posteriormente, la dispersión se transfirió a un baño de temperatura controlada a 3 °C y se agregaron 0.3 mL de ANI destilada, seguidos de 2.5 mL de una solución 1 M de H_2SO_4, y la mezcla se agitó durante 20 min. A continuación, se inició la copolimerización de ANI con poli(MAA) añadiendo 2.5 mL de una solución 1 M de APS y el medio de reacción se mantuvo en agitación constante durante 3 h. El producto obtenido (poli(MAA-co-ANI)) se centrifugó a 12 000 rpm, se lavó varias veces con agua desionizada, se congeló y se liofilizó durante 48 h. Es importante mencionar que, a modo de comparación, también se preparó poli(ANI) siguiendo la misma metodología.

CARACTERIZACIÓN

Los patrones DRX se obtuvieron en el intervalo de 10 a 80° (2θ), utilizando un difractómetro Rigaku Ultima IV con radiación CuKα, operado a 40 kV y 44 mA. Los espectros FTIR se adquirieron en un espectrofotómetro FTIR Nicolet Magna 550, utilizando el método de reflectancia total atenuada (ATR), en la región de frecuencia de 4000 a 400 cm^{-1}. El análisis TGA se realizó bajo una atmósfera controlada de nitrógeno desde temperatura ambiente hasta 700 °C a una velocidad de calentamiento de 10 °C min^{-1}, usando un termoanalizador TGA Q 500 (TA Instruments). Los espectros UV-vis se registraron entre 300 y 1000 nm con un espectrofotómetro CARY60 (Agilent).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ESPECTROSCOPIA FTIR

Los espectros FTIR de poli(MAA), poli(ANI) y poli(MAA-co-ANI) se presentan en la figura 1. El espectro FTIR de poli(MAA) exhibió bandas pronunciadas en 1695 y 1161 cm^{-1}, atribuidas al estiramiento de los enlaces C=O y C-O de los grupos carboxílicos, respectivamente. Adicionalmente, las bandas localizadas en 1425 y 1510 cm^{-1} se asociaron con las vibraciones de deformación del enlace C=O correspondientes a los grupos -COO^- y -COOH. La señal en 1388 cm^{-1} se atribuyó a las vibraciones simétricas del grupo -COO^- y a la deformación del enlace C-H, mientras que la banda en 824 cm^{-1} se asignó a las vibraciones del enlace C-H fuera del plano (Sharma, Kumar, et al., 2015; Tong et al., 2020; Zhang et al., 2023). Por su parte, el espectro FTIR de poli(ANI) exhibió señales intensas en 1565 y 1485 cm^{-1}, características de los movimientos vibracionales de los anillos quinoides (Q) y benzoides (β), respectivamente. Las señales observadas en 1291 y 1235 cm^{-1} correspondieron a la vibración de estiramiento del enlace C-N de los anillos β y al estiramiento C-N en su forma protonada. Asimismo, las bandas ubicadas en 1133 y 1028 cm^{-1} se atribuyeron al estiramiento N=Q=N y a la vibración de flexión del enlace C-H en el plano del anillo aromático, respectivamente (Deshmukh et al., 2019; Rahman Khan et al., 2022; Tong et al., 2020). En el espectro FTIR del copolímero poli(MAA-co-ANI) se identificaron señales características de ambos homopolímeros. Sin embargo, se observaron ligeros desplazamientos en las señales hacia menores números de onda (±13 cm^{-1}), particularmente en las bandas asociadas a los enlaces C=O y C-N, lo que sugiere la existencia de puentes de hidrógeno entre los grupos amino de poli(ANI) y los grupos carboxílicos de poli(MAA) (Sharma, Kumar, et al., 2015; Tong et al., 2020).

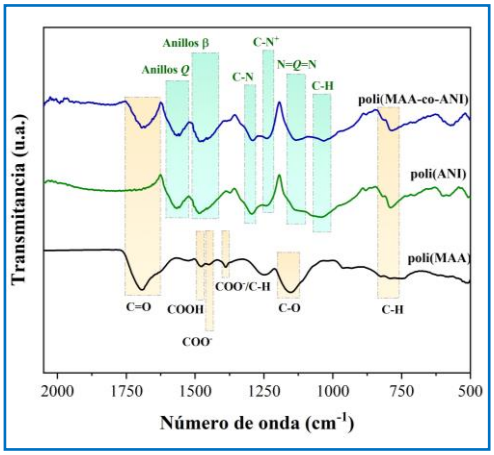


Figura 1. Espectros FTIR de las diferentes muestras sintetizadas.

RESULTADOS DE TGA

La estabilidad térmica de poli(MAA-co-ANI) se evaluó mediante análisis TGA y, con fines comparativos, se incluyeron los termogramas de los homopolímeros (figura 2). La curva TGA de poli(ANI) presentó tres etapas bien definidas de pérdida de masa. La primera, en el intervalo de 25 a 150 °C, se atribuyó a la eliminación de moléculas de agua físicamente adsorbidas. La segunda etapa, comprendida entre 250 y 450 °C, se asoció con la ruptura de la cadena principal de poli(ANI) y la eliminación de moléculas dopantes. Finalmente, la tercera etapa (450 a 800 °C) correspondió a la degradación térmica total de poli(ANI) (Lalegül-Ülker y Elçin, 2021; Liu et al., 2020). Por otro lado, la curva TGA de poli(MAA) presentó una pérdida inicial de masa en el intervalo de 25 a 150 °C, atribuida a la eliminación de agua fisisorbida. Posteriormente, se observó una segunda pérdida de masa en el intervalo de 150 a 250 °C, con una temperatura máxima de degradación (DTG) de 230.6 °C, asociada a la deshidratación de los grupos colgantes de las cadenas de poli(MAA). La pérdida de masa registrada en el intervalo de 250 a 350 °C (DTG = 295.5 °C) se relacionó con la descarboxilación de los grupos carboxílicos (-COOH). Finalmente, la etapa comprendida entre 380 y 600 °C, con una DTG de 403.1 °C, se atribuyó a la degradación térmica de las cadenas acrílicas de poli(MAA) (Sánchez-Orozco et al., 2023, 2024). Por su parte, el copolímero poli(MAA-co-ANI) exhibió un comportamiento de pérdida de masa intermedio respecto a los homopolímeros, pero con ligeros desplazamientos en las temperaturas de degradación y un incremento del residuo carbonoso, lo que sugiere la formación de interacciones intermoleculares entre las cadenas de poli(MAA) y poli(ANI) (Rahmouni & Belbachir, 2019; Sharma, Kumar, et al., 2015).

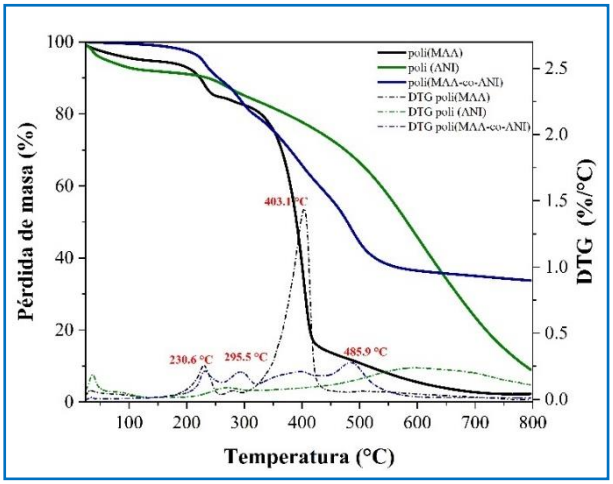


Figura 2. Curvas TGA/DTG de las diferentes muestras sintetizadas.

ANÁLISIS DE DRX

La estructura cristalina del poli(MAA-co-ANI) se investigó mediante DRX y el patrón de difracción resultante se muestra en la figura 3. A modo de comparación, también se incluye el patrón de DRX de poli(ANI). El difractograma de poli(ANI) exhibe picos amplios, pero bien definidos en 2θ = 8.5, 14.9, 20.1, 25.4, 26.9, 29.9 y 41.8°, que se atribuyen a reflexiones de los planos cristalográficos (001), (010), (100), (110), (111), (020) y (200), respectivamente, lo que confirma la naturaleza semicristalina del polímero (Lalegül-Ülker y Elçin, 2021). Por el contrario, los patrones de DRX del poli(MAA-co-ANI) muestran una notable reducción de la intensidad y la nitidez de los picos, junto con un ensanchamiento significativo de estos, lo que sugiere una disminución del orden estructural debido a las interacciones intermoleculares entre los grupos $-COO^-$ del poli(MAA) y los grupos NH_3^+ del poli(ANI), que interrumpen parcialmente el arreglo semicristalino de las cadenas de poli(ANI) (Fazli-Shokouhi et al., 2021; Tong et al., 2020).

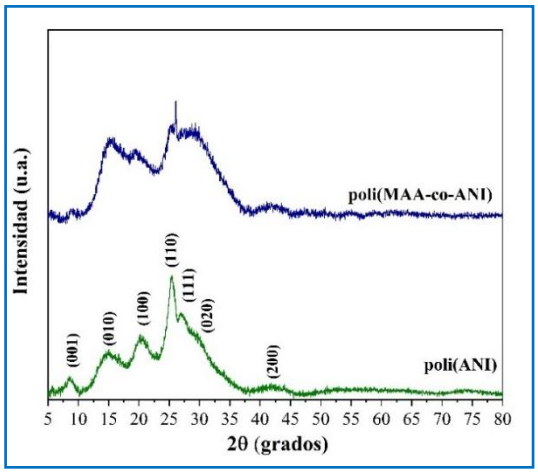


Figura 3. Patrones de DRX de poli(ANI) y poli(MAA-co-ANI).

ANÁLISIS POR ESPECTROSCOPÍA UV-VIS

El espectro UV-vis de poli(MAA-co-ANI) a pH 4 y 7.4 se muestra en la figura 4. A pH 4, el compuesto presentó dos picos de absorción máxima a 330 y 420 nm, atribuidos a las transiciones π-π^* de los anillos aromáticos β y a la transición polarón-π^* derivada de la protonación de los grupos amina de poli(ANI). Adicionalmente, se observó una banda de absorción ancha en el intervalo de 700 a 950 nm (λ_{max}= 893 nm), atribuida a la transición π-polarón debido a la deslocalización de cargas a lo largo de las cadenas del compuesto, lo cual es característico de la presencia de poli(ANI) en su forma sal esmeraldina (Grgur et al., 2023; Salem & Grgur, 2017). El

ensanchamiento y desplazamiento de las bandas a mayores longitudes de onda, respecto a lo informado previamente en la literatura para poli(ANI) prístina (Padmapriya et al., 2018; Rahmouni y Belbachir, 2019; Salem y Grgur, 2017), pueden deberse a la estabilización de especies polaron/bipolaron mediante interacciones intermoleculares entre los grupos del COO^- de poli(MAA) y los grupos NH_3^+ de poli(ANI) que modifican la conjugación electrónica y estabilizan el estado dopado del compuesto (Grgur et al., 2023; Rahmouni & Belbachir, 2019). Por otro lado, el espectro UV -vis de poli(MAA-co-ANI) a pH 7.4 presentó únicamente dos bandas de absorción máxima en 330 y 630 nm, atribuidas a las transiciones π-π* de los anillos β y a la excitación molecular de la estructura quinoide-imina, lo que indica la deprotonación parcial de las cadenas de poli(ANI) y su transición hacia la forma base esmeraldina (Ando et al., 2008; Grgur et al., 2023). Además, bajo estas condiciones de pH, las cadenas de poli(MAA) se encuentran ionizadas (pK_a = 5.5), lo que incrementa la carga negativa del compuesto y desestabiliza el estado dopado de las cadenas de poli(ANI) (Sánchez-Orozco et al., 2024).

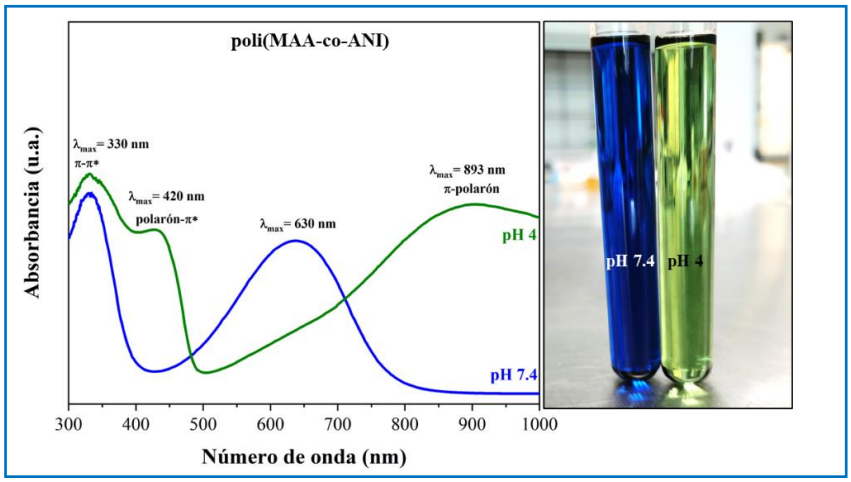


Figura 4. Espectros UV-vis e imagen óptica de soluciones acuosas de poli(MAA-co-ANI) (0.1 mg/mL) ajustadas a dos valores de pH.

Los resultados confirmaron que poli(MAA-co-ANI) presenta un comportamiento pH-sensible, en el que la protonación y deprotonación de los grupos -COOH de poli(MAA) y de los grupos amina/imina de poli(ANI) inducen cambios en la carga superficial, el estado de dopaje y la conformación estructural del sistema. Estos mecanismos de respuesta permiten modular las interacciones intermoleculares del poli(MAA-co-ANI) en función del entorno, favoreciendo distintos tipos de interacciones, como fuerzas electrostáticas, enlaces de hidrógeno e interacciones π-π con diferentes compuestos orgánicos (Doh et

al., 2025), lo que hace que poli(MAA-co-ANI) sea atractivo para su aplicación en diversos campos, como la electrónica, el ámbito biomédico y la remediación ambiental. Desde una perspectiva funcional, las variaciones en la carga superficial y en el estado electrónico del copolímero, junto con las modificaciones en el orden estructural, sugieren una reorganización de las cadenas de la red polimérica que puede influir en la accesibilidad y la disponibilidad de los sitios activos. En particular, en aplicaciones de remediación ambiental, estas características podrían favorecer la interacción selectiva con contaminantes emergentes según su naturaleza iónica (Doh et al., 2025; Samadi et al., 2023). Es decir, en medios ácidos, el sistema poli(MAA-co-ANI) podría presentar mayor afinidad por especies aniónicas, como ciertos colorantes o fármacos, mediante interacciones electrostáticas, mientras que en condiciones neutras o básicas podría favorecer la interacción con especies catiónicas. Adicionalmente, la reversibilidad asociada a los procesos de protonación-desprotonación y a las transiciones en el estado electrónico de poli(ANI) sugiere la posibilidad de establecer mecanismos de tipo carga-liberación, lo cual es relevante en términos de la potencial regeneración y reutilización del material mediante ajustes de pH (Samadi et al., 2023). En conjunto, estas características evidencian una relación directa entre las propiedades estructurales y el comportamiento funcional del sistema, lo que respalda su proyección como material inteligente con potencial de aplicación en el tratamiento de aguas contaminadas.

En comparación con estudios previos que reportan sistemas basados en poli(ANI) y polímeros acrílicos, tales como hidrogeles multifuncionales con nanopartículas metálicas (Sharma et al., 2014; Sharma, Kaith, et al., 2015; Virk et al., 2025), redes interpenetrantes Sharma et al., 2015; Sanattalab et al., 2025; Singhal & Datta, 2007), nanocompuestos híbridos (Sanattalab et al., 2025; Singhal y Datta, 2007), el sistema poli(MAA-co-ANI) propuesto en este trabajo corresponde a un copolímero sintetizado sin el uso de reticulantes ni agentes modificadores externos. Por lo tanto, esta estrategia permite evaluar directamente la interacción entre poli(MAA) y poli(ANI), proporcionando una comprensión más clara de la relación entre su estructura, su estado electrónico y su comportamiento pH-responsivo, lo cual es clave para futuras investigaciones sobre su aplicabilidad.

CONCLUSIONES

Se sintetizó un sistema polimérico mediante la conjugación de cadenas de poli(MAA) y poli(ANI) por polimerización química *in situ*. El análisis FTIR confirmó la conjugación exitosa de ambos componentes y evidenció la posible formación de interacciones intermoleculares entre las cadenas poliméricas. Los resultados de DRX sugirieron una modificación del grado de orden estructural con respecto a poli(ANI), mientras que el análisis de TGA evidenció variaciones en la estabilidad térmica atribuibles a la incorporación de cadenas de poli(MAA) en la matriz polimérica. Por su parte, los estudios UV-vis demostraron que el sistema poli(MAA-co-ANI) presenta un comportamiento sensible al pH, lo que refleja cambios en su estructura electrónica asociados a procesos de protonación y deprotonación de sus grupos funcionales. En conjunto, estos resultados confirman la obtención de un sistema polimérico inteligente con propiedades fisicoquímicas modulables, lo que sugiere su potencial como plataforma funcional para aplicaciones relacionadas con la remediación del agua. No obstante, es importante señalar que el presente estudio se centró en la síntesis y caracterización del material, por lo que no se evaluó su desempeño en procesos de remediación, ni en condiciones simuladas ni en condiciones reales. En este sentido, se plantea, como trabajo a futuro, la realización de estudios de adsorción-desorción, así como el análisis de la cinética y las isotermas, que permitan evaluar su interacción con contaminantes emergentes, como colorantes o fármacos, y su posible capacidad de reutilización. De este modo, el sistema poli(MAA-co-ANI) sienta las bases para investigaciones posteriores orientadas a su aplicación en la remediación del agua.

AGRADECIMIENTOS

Jorge L. Sánchez-Orozco y Gabriela Y. Romero-Zúñiga agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) de México por la beca posdoctoral otorgada. Gustavo Soria-Argüello agradece al programa "Investigadores por México- SECIHTI". De igual forma, los autores agradecen al Proyecto CBF-2025-I-4203 (SECIHTI) y a Jesús A. Mercado Silva por su apoyo técnico.

REFERENCIAS

Ando, R. A., do Nascimento, G. M., Landers, R., & Santos, P. S. (2008). Spectroscopic investigation of conjugated polymers derived from nitroanilines. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 69*(2), 319–326. https://doi.org/10.1016/j.saa.2007.03.046

Deshmukh, S. P., Dhodamani, A. G., Patil, S. M., Mullani, S. B., More, K. V., & Delekar, S. D. (2019). Interfacially interactive ternary silver-supported polyaniline/multiwalled carbon nanotube nanocomposites for catalytic and antibacterial activity. *ACS Omega, 5*(1), 219–227. https://doi.org/10.1021/acsomega.9b02526

Doh, S., Eom, S., Choi, S. S., Chung, H., Kim, T., Zoh, K. D., Kim, B., & Kim, K. (2025). Polyaniline as an integrated amine-redox platform for reversible electrosorption and energy-efficient PFAS remediation: From molecular mechanisms to system integration. *Environmental Science & Technology, 60*(1), 1474–1487. https://doi.org/10.1021/acs.est.5c12920

Fang, H., Shan, B., Han, C., Zhu, B., Gu, C., Tan, W., Tian, Y., Ma, J., & Liu, T. (2026). Recent progress in core-shell composites for adsorption in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, *380,* 135480. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.135480.

Fazli-Shokouhi, S., Nasirpouri, F., & Khatamian, M. (2021). Epoxy-matrix polyaniline/p-phenylenediamine-functionalised graphene oxide coatings with dual anti-corrosion and anti-fouling performance. *RSC Advances*, *11*(19): 11627–11641. https://doi.org/10.1039/d0ra10665h

Grgur, B. N., Popović, A. S., & Salem, A. (2023). Influence of alkyd composite coatings with polyaniline doped with different organic acids on the corrosion of mild steel. *Metals, 13*(8), 1364. https://doi.org/10.3390/met13081364

Lai, Y., Wang, F., Zhang, Y., Ou, P., Wu, P., Fang, Q., Chen, Z., & Li, S. (2019). UiO-66 derived N-doped carbon nanoparticles coated by PANI for simultaneous adsorption and reduction of hexavalent chromium from waste water. *Chemical Engineering Journal*, *378*, 122069. https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122069

Lalegül-Ülker, Ö., & Elçin, Y. M. (2021). Magnetic and electrically conductive silica-coated iron oxide/polyaniline nanocomposites for biomedical applications. *Materials Science and Engineering: C, 119*, 111600. https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.111600

Liu, Y., Song, L., Du, L., Gao, P., Liang, N., Wu, S., Minami, T., Zang, L., Yu, C., & Xu, X. (2020). Preparation of Polyaniline/Emulsion Microsphere Composite for Efficient Adsorption of Organic Dyes. *Polymers,* 12: 10167. https://doi.org/10.3390/polym12010167

Muambo, K. E., Kim, M. G., Kim, D. H., Park, S., & Oh, J. E. (2024). Pharmaceuticals in raw and treated water from drinking water treatment plants nationwide: Insights into their sources and exposure risk assessment. *Water Research X, 24*, 100256. https://doi.org/10.1016/j.wroa.2024.100256

Padmapriya, S., Harinipriya, S., Jaidev, K., Sudha, V., Kumar, D., & Pal, S. (2018). Storage and evolution of hydrogen in acidic medium by polyaniline. *International Journal of Energy Research, 42*(3), 1196–1209. https://doi.org/10.1002/er.3920

Rahman Khan, M. M., Islam, M., Amin, M. K., Paul, S. K., Rahman, S., Talukder, M. M., & Rahman, M. M. (2022). Simplistic fabrication of aniline and pyrrole-based poly(Ani-co-Py) for efficient photocatalytic performance and supercapacitors. *International Journal of Hydrogen Energy, 47*(89), 37860–37869. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.296 628 Química para publicar(1)

Rahmouni, A., & Belbachir, M. (2019). Molecular structure of PANI and its homologue PANI–PEO2000 catalyzed by Maghnite-H+ (Algerian MMT): synthesis, characterization and physical and chemical properties. *Polymer Bulletin*, *76*(9): 4677–4701. https://doi.org/10.1007/s00289-018-2620-7

Salem, A. A., & Grgur, B. N. (2017). Corrosion of mild steel with composite alkyd polyaniline-benzoate coating. *International Journal of Electrochemical Science, 12*(9), 8683–8694. https://doi.org/10.20964/2017.09.57

Samadi, A., Wang, Z., Wang, S., Nataraj, S. K., Kong, L., & Zhao, S. (2023). Polyaniline-based adsorbents for water treatment: Roles of low-cost materials and 2D materials. *Chemical Engineering Journal, 478*, 147506. https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.147506

Sanattalab, E., Yıldırım-Tirgil, N., & Aksun-Tümerkan, E. T. (2025). A novel hybrid nanocomposite of curcumin, silver, and polyaniline in a PMAA–EGDMA network for enhanced electrochemical and antibacterial performance. *ChemistrySelect, 10*(39), e05002. https://doi.org/10.1002/slct.202505002

Sánchez-Orozco, J. L., Meléndez-Ortiz, H. I., Puente-Urbina, B. A., Garcia-Uriostegui, L., Camacho-Villegas, T. A., Lugo-Fabres, P. H., & García-Cerda, L. A. (2024). Thermo and pH-responsive nanocarriers based on mesocellular silica foam and poly(N-vinylcaprolactam-co-methacrylic acid): Synthesis, characterization, and *in vitro* cytotoxicity assay. *Journal of Drug Delivery Science and Technology, 98*, 105849. https://doi.org/10.1016/j.jddst.2024.105849

Sánchez-Orozco, J. L., Meléndez-Ortiz, H. I., Puente-Urbina, B. A., Rodríguez-Fernández, O. S., Martínez-Luévanos, A., & García-Cerda, L. A. (2023). Synthesis and characterization of a pH- and temperature-sensitive Fe_3O_4-SiO_2-poly(NVCL-co-MAA) nanocomposite for controlled delivery of doxorubicin anticancer drug. *Polymers, 15*(4), 968. https://doi.org/10.3390/polym15040968

Sharma, K., Kumar, V., Kaith, B. S., Kumar, V., Som, S., Kalia, S., & Swart, H. C. (2014). A study of the biodegradation behaviour of poly(methacrylic acid/aniline)-grafted gum ghatti by a soil burial method. RSC *Advances*, *4*, 25637–25649. https://doi.org/10.1039/C4RA03765K

Sharma, K., Kumar, V., Kaith, B. S., Som, S., Kumar, V., Pandey, A., Kalia, S., & Swart, H. C. (2015). Synthesis of biodegradable gum ghatti based poly(methacrylic acid-aniline) conducting IPN hydrogel for controlled release of amoxicillin trihydrate. *Industrial & Engineering Chemistry Research, 54*(7), 1982–1991. https://doi.org/10.1021/ie5044743

Singhal, R., & Datta, M. (2007). Development of nanocomposites of bentonite with polyaniline and poly(methacrylic acid). *Journal of Applied Polymer Science, 103*(5), 3299–3306. https://doi.org/10.1002/app.25334

Tong, J., Han, C., Hao, X., Qin, X., & Li, B. (2020). Conductive polyacrylic acid-polyaniline as a multifunctional binder for stable organic quinone electrodes of lithium-ion batteries. *ACS Applied Materials & Interfaces, 12*(35), 39630–39638. https://doi.org/10.1021/acsami.0c10347

Virk, K., Kumar, V., Kumar, A., Kumar, S., Gaur, J., & Dalal, J. (2025). Functionalized gum acacia hydrogels with silver nanoparticles for enhanced antimicrobial and environmental applications. *Applied Organometallic Chemistry, 39*(8), e70309. https://doi.org/10.1002/aoc.70309

Wang, Y., Wang, T., Liu, Y., Geng, H.-Z., & Zhang, L. (2022). Environment-friendly AgNWs/$Ti_3C_2T_x$ transparent conductive film based on natural fish gelatin for degradable electronics. *Frontiers in Chemistry, 10*, 973115. https://doi.org/10.3389/fchem.2022.973115

Zhang, Q., Galvan-Miyoshi, J. M., Pezzotti, F., & Ming, W. (2023). Novel eco-friendly initiation system based on vitamin C for energy efficient synthesis of PMAA hydrogel used for delivery of phenolic compounds. *Chemical Engineering Journal*, *459*(8): 141580. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2013.05.018

CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA Y ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE DE UNA BEBIDA FERMENTADA TIPO KOMBUCHA ELABORADA CON ORUJO DE *VITIS VINIFERA*

PHYSICOCHEMICAL CHARACTERIZATION AND ANTIOXIDANT ACTIVITY OF A KOMBUCHA-TYPE FERMENTED BEVERAGE MADE WITH VITIS VINIFERA GRAPE POMACE

BARRAZA AMAYA, José R. [1]

RAMÍREZ GUZMÁN, Karen Nathiely. [1]

FLORES LOYOLA, Erika [2]

TORRES LEÓN, Cristian [2]

SÁNCHEZ AGUIRRE, María C. [1]

REYNA MARTÍNEZ, Ricardo [3]

1. Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Coahuila. Torreón, Coahuila, México.
2. Centro de Investigación y Jardín Etnobiológico, Universidad Autónoma de Coahuila. Viesca, Coahuila, México.
3. Agri-Food and Agro-Industrial Bioeconomy Research Group, Universidad Autónoma de Coahuila. Torreón. Coahuila, México.

RESUMEN

Este estudio caracterizó de forma comparativa y descriptiva una bebida fermentada tipo kombucha elaborada con orujo de *Vitis vinifera* frente a un control de té verde de *Camellia sinensis*. El orujo se secó a 60 °C durante 24 h, se molió y se tamizó a 0.425 mm. Cada tratamiento se preparó en tres frascos independientes con 300 mL de infusión y 150 mL de kombucha de té verde como iniciador, equivalente a 33.3 % v/v del volumen final, y se fermentó durante 14 días a 25–32 °C. El SCOBY se evaluó en los días 7, 9, 12 y 14. El pH, °Brix y la acidez titulable se registraron en los días 0 y 7, y la inhibición del radical DPPH en los días 0, 7 y 14. En el tratamiento con orujo, el pH disminuyó de 2.46 a 2.17 y la acidez alcanzó 0.132 % al día 7. La biomasa húmeda del SCOBY fue numéricamente menor que en té verde, con diámetro final similar. La inhibición de DPPH fue de 93.8 %, 73.4 % y 87.1 % en orujo, frente a 82.6 %, 51.0 % y 71.5 % en té verde. Los resultados sugieren una matriz fermentable con potencial antioxidante in vitro. La falta de estadística inferencial, controles no fermentados y normalización del ensayo limita la atribución causal.

Palabras clave: orujo de uva; kombucha; SCOBY; DPPH; fermentación; antioxidantes.

ABSTRACT

This study descriptively compared a kombucha-type fermented beverage made with Vitis vinifera grape pomace with a Camellia sinensis green tea control. Grape pomace was dried at 60 °C for 24 h, milled, and sieved to 0.425 mm.

Correspondencia
nathiely.ramirez@uadec.edu.mx
https://orcid.org/0000-0002-7122-9967

Fecha de recepción
6 de mayo de 2026.
Fecha de aceptación
13 de agosto de 2026.

Each treatment consisted of three independent jars containing 300 mL of infusion and 150 mL of green-tea kombucha starter, equivalent to 33.3 % v/v of the final volume, and was fermented for 14 days at 25-32 °C. SCOBY was evaluated on days 7, 9, 12, and 14. pH, °Brix, and titratable acidity were recorded on days 0 and 7, and DPPH inhibition on days 0, 7, and 14. In the pomace treatment, pH decreased from 2.46 to 2.17 and acidity reached 0.132 % by day 7. Wet SCOBY biomass was numerically lower than in green tea, with a similar final diameter. DPPH inhibition was 93.8 %, 73.4 %, and 87.1 % in pomace, compared with 82.6 %, 51.0 %, and 71.5 % in green tea. The results suggest a fermentable matrix with in vitro antioxidant potential. The lack of inferential statistics, unfermented controls, and assay normalization limits causal attribution.

Keywords: *grape pomace; kombucha; SCOBY; DPPH; fermentation; antioxidants.*

INTRODUCCIÓN

La industria vitivinícola genera una proporción significativa de subproductos sólidos durante el prensado y la vinificación. El orujo, integrado principalmente por hollejos, semillas y restos de pulpa, suele representar entre el 20 % y el 30 % de la masa de uva procesada. A escala internacional, la generación de subproductos de la industria del vino se estima en torno a 20 millones de toneladas al año. Su manejo incluye compostaje, alimentación animal y recuperación de compuestos bioactivos, aunque una parte conserva un bajo grado de valorización. Esta composición y disponibilidad han favorecido el estudio del orujo como fuente de fenoles, antocianinas, taninos y otros compuestos de interés para alimentos y bioprocesos (Barakat et al., 2024; Mangiapelo et al., 2024; Lopes et al., 2025).

La kombucha es una bebida obtenida mediante la fermentación aeróbica de una infusión azucarada por un cultivo simbiótico de bacterias y levaduras, denominado SCOBY por sus siglas en inglés, Symbiotic Culture of Bacteria and Yeast. En la formulación tradicional se emplea Camellia sinensis. Las levaduras hidrolizan y fermentan carbohidratos, mientras bacterias ácido-acéticas, entre ellas especies de Komagataeibacter, Gluconobacter y Acetobacter, oxidan metabolitos y favorecen la acumulación de ácidos orgánicos y la formación de una biopelícula de celulosa bacteriana. La magnitud de estos cambios depende del sustrato, del consorcio, de la

temperatura, del tiempo y de la proporción de inóculo (Savary et al., 2021; Aung y Eun, 2022; Wang et al., 2022; Chong et al., 2024; Alves et al., 2025).

El reemplazo parcial o total del té por matrices vegetales modifica la disponibilidad de nutrientes y compuestos bioactivos. Bortolomedi et al. (2022) documentaron que el sustrato y las condiciones de fermentación influyen en la composición de las bebidas tipo kombucha. Estudios experimentales posteriores han mostrado modificaciones en el pH, la acidez, la biomasa, los metabolitos y las propiedades antioxidantes cuando se modifica la matriz de fermentación o la composición microbiana (Bressani et al., 2024; Kilmanoğlu et al., 2024; Zhang et al., 2024). Estas variaciones obligan a distinguir los cambios generados por la fermentación de los asociados con la extracción del sustrato o con el propio líquido iniciador.

El uso de subproductos de uva en fermentaciones tipo kombucha cuenta con evidencia reciente y directamente relacionada con esta propuesta. Barakat et al. (2024) evaluaron kombucha a partir de orujo y observaron que las condiciones de fermentación modificaron los azúcares, los ácidos orgánicos, los polifenoles, las antocianinas y la actividad antioxidante. Balmaseda et al. (2024) estudiaron la producción de kombucha con orujo de uva como estrategia para la valorización de un subproducto enológico. Cánovas et al. (2025) analizaron bebidas fermentadas formuladas con subproductos de bodega y observaron cambios en parámetros fisicoquímicos y en compuestos fenólicos durante el proceso. En conjunto, estos trabajos respaldan la pertinencia de evaluar matrices vitivinícolas, pero también evidencian la necesidad de medir directamente los componentes a los que se atribuyen los efectos observados.

La actividad antioxidante in vitro constituye una respuesta química útil para explorar la capacidad reductora de una muestra, pero no equivale, por sí misma, a un beneficio funcional en humanos. Del mismo modo, la formación de SCOBY y la acidificación evidencian actividad fermentativa, pero no sustentan una condición probiótica. Esta última exige identificar y cuantificar microorganismos viables, demostrar su estabilidad y evaluar su seguridad y su comportamiento en condiciones gastrointestinales. En este trabajo se evita dicha atribución y se limita la interpretación a las variables medidas.

El objetivo de esta investigación fue caracterizar de forma comparativa y descriptiva una bebida fermentada tipo kombucha elaborada con orujo de Vitis vinifera frente a una kombucha control de té verde, mediante el

seguimiento del desarrollo del SCOBY, del pH, de los sólidos solubles, de la acidez titulable y de la actividad antioxidante in vitro por inhibición del radical DPPH.

METODOLOGÍA

DISEÑO EXPERIMENTAL Y ALCANCE DE LAS RÉPLICAS

Se trabajó con dos tratamientos fermentados: una infusión de té verde de Camellia sinensis como control y otra elaborada con orujo de Vitis vinifera como tratamiento experimental. Cada tratamiento se distribuyó en tres frascos de fermentación independientes. Cada frasco se consideró una unidad experimental. Las mediciones sucesivas realizadas sobre un mismo frasco corresponden a seguimiento temporal de esa unidad y no a réplicas nuevas.
La fermentación duró 14 días. Los tiempos se organizaron de acuerdo con la variable disponible en el registro experimental. El desarrollo del SCOBY, expresado en peso húmedo, diámetro y grosor, se documentó en los días 7, 9, 12 y 14 para seguir la biopelícula desde su establecimiento visible hasta el final del proceso. El pH, los sólidos solubles y la acidez titulable se registraron en los días 0 y 7. La actividad antioxidante por DPPH se evaluó en los días 0, 7 y 14.

OBTENCIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DEL ORUJO DE UVA

El orujo de uva se obtuvo de una bodega local de Parras, Coahuila, México. El material se secó en el horno MIGSA FD-1 (Ciudad de México, México) a 60 °C durante 24 h. Después se molió en un molino multifuncional GM-800S (Shenzhen, China) y se tamizó hasta obtener una fracción de 0.425 mm con un tamiz FIICSA (Ciudad de México, México). La harina se almacenó en envases de grado alimentario, sellados al vacío y protegidos de la luz, hasta su uso. El secado y la reducción de tamaño favorecen la estabilidad del residuo y modifican la recuperación de compuestos solubles a partir de la matriz vegetal (Mangiapelo et al., 2024).

No se registraron la variedad de Vitis vinifera ni el tipo de vinificación del lote del que procedió el orujo, ni se realizó una caracterización inicial de fenoles

totales, flavonoides o antocianinas. Esta falta de información constituye una limitación para relacionar la composición inicial del residuo con la respuesta antioxidante observada.

PREPARACIÓN DE LAS INFUSIONES Y FERMENTACIÓN TIPO KOMBUCHA

Para la formulación con orujo, se pesaron 5.58 g de harina, cantidad equivalente al peso del contenido de cuatro bolsas comerciales de té verde empleadas en el tratamiento de control. Cada sustrato se adicionó a 900 mL de agua previamente hervida con 125 g de sacarosa. La infusión se mantuvo durante 5 min y se filtró con embudo y papel filtro para retirar sólidos suspendidos.

Las infusiones se distribuyeron en frascos de vidrio de 600 mL. Se prepararon tres frascos con 300 mL de infusión de té verde y tres con 300 mL de infusión de orujo. Antes de inocular, se tomó una alícuota de la infusión sin iniciador para el registro del día 0. Después, cada frasco recibió 150 mL de kombucha de té verde como líquido iniciador. El volumen final por frasco fue de 450 mL, de modo que el iniciador representó 33.3 % v/v. Esta proporción se mantuvo constante en ambos tratamientos para preservar la comparabilidad interna. La literatura reciente confirma que la concentración del inóculo influye en la acidificación, los sólidos solubles y la capacidad antioxidante de kombucha, por lo que su contribución debe considerarse al interpretar los resultados (Alves et al., 2025).

El uso de un iniciador a partir de té verde introduce una fracción común de compuestos y microorganismos en ambos tratamientos. En la bebida con orujo, una parte de los compuestos fenólicos y de la respuesta antioxidante posterior a la inoculación puede proceder de ese iniciador. El diseño original no incluyó infusiones de té verde y orujo mantenidas sin fermentación bajo condiciones equivalentes. En consecuencia, el estudio compara dos sistemas fermentados, pero no permite separar experimentalmente el efecto de la fermentación de los efectos de la extracción, la oxidación, el almacenamiento y el aporte del iniciador.

Los frascos se cubrieron con una manta limpia y se fijaron con ligas para permitir el intercambio gaseoso y reducir la entrada de partículas. La fermentación se realizó en condiciones estáticas, sin luz directa, durante 14 días a temperatura ambiente entre 25 y 32 °C. La disponibilidad de oxígeno

favorece la actividad de bacterias ácido-acéticas y la formación de celulosa bacteriana en fermentaciones de kombucha (Savary et al., 2021; Bertsch et al., 2021). La figura 1 muestra los seis frascos empleados durante la fermentación.



Figura 1. Bebidas de té verde y orujo de uva durante la fermentación tipo kombucha.

MUESTREO

Las muestras líquidas se tomaron bajo condiciones de manipulación higiénica. El día 0 correspondió a una alícuota obtenida antes de agregar el líquido iniciador. Los muestreos posteriores se efectuaron a partir de los frascos inoculados. Para DPPH se conservaron muestras de los días 0, 7 y 14. Los parámetros fisicoquímicos consolidados disponibles corresponden a los días 0 y 7. Las muestras destinadas a análisis posteriores se conservaron congeladas hasta su procesamiento.

EVALUACIÓN MORFOMÉTRICA DEL SCOBY

La formación del SCOBY se evaluó los días 7, 9, 12 y 14. El diámetro y el grosor se midieron con un vernier y se expresaron en centímetros. El peso húmedo se determinó en balanza y se expresó en gramos. Los valores disponibles en el manuscrito corresponden a promedios consolidados de los tres frascos por tratamiento. Los registros individuales completos de cada frasco no forman parte del conjunto documental disponible para esta revisión, por lo que no se reconstruyeron desviaciones estándar ni pruebas de significancia a partir de los promedios.

DETERMINACIÓN DE pH Y SÓLIDOS SOLUBLES TOTALES

El pH se determinó con un potenciómetro digital Vantakool X001NLC91J (China). Los sólidos solubles totales se expresaron en °Brix. En una bebida fermentada, esta lectura refractométrica representa el conjunto de solutos que modifican el índice de refracción y no una medición específica de sacarosa. Ácidos orgánicos, etanol, compuestos fenólicos y otros solutos también afectan la lectura. Por esta razón, los cambios en °Brix se interpretaron como variaciones de sólidos solubles y no como un aumento o una disminución directa de azúcares (Aung y Eun, 2022; Dartora et al., 2023).

ACIDEZ TITULABLE

La acidez titulable se determinó mediante titulación ácido-base con NaOH. La muestra se diluyó 1:10 con agua destilada en matraz aforado de 100 mL. Una alícuota de 10 mL de la dilución se transfirió a un matraz Erlenmeyer, se agregaron 2-3 gotas de fenolftaleína y se tituló con NaOH hasta el viraje. La acidez se expresó como porcentaje de ácido acético mediante la relación siguiente:

$$\text{Acidez titulable (\%)} = (V_{NaOH} \times N_{NaOH} \times 0.06005 \times FD \times 100) / V_{muestra}$$

En la expresión, V_{NaOH} corresponde al volumen de titulante gastado, N_{NaOH} a su normalidad, FD al factor de dilución y Vmuestra al volumen de la muestra titulada. Los resultados se redondearon a tres decimales, de acuerdo con la precisión práctica del procedimiento.

FRACCIONAMIENTO CON AMBERLITE XAD-7 PREVIO AL ENSAYO ANTIOXIDANTE

Las muestras acuosas destinadas al análisis antioxidante se sometieron a fraccionamiento mediante resina Amberlite XAD-7 (Sigma-Aldrich). La resina se activó con metanol, se empacó en una columna de 5 mL y se acondicionó con agua destilada. Después de cargar la muestra, la columna se lavó de cuatro a cinco veces con agua y la fracción retenida se recuperó con etanol. Las fracciones se evaporaron a 38 °C durante 24 h y el residuo seco se protegió de la luz hasta el análisis.

El registro experimental disponible no consigna el volumen exacto de muestra cargada, el volumen individual de cada lavado, el volumen de etanol empleado ni la concentración final del extracto reconstituido. En consecuencia, esta etapa se reporta para documentar el pretratamiento

realmente efectuado, pero no se interpreta como una cuantificación de polifenoles ni se usa para estimar la recuperación cromatográfica.

ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE POR DPPH

La actividad antioxidante se determinó mediante el radical 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo (DPPH), siguiendo el procedimiento descrito por Molyneux (2004), con modificaciones. Se preparó DPPH a 60 μM. Para cada lectura, se mezclaron 2900 μL de la solución de DPPH con 100 μL de muestra, se incubó durante 30 min a oscuridad y se midió la absorbancia a 517 nm. Se empleó etanol como blanco y una solución DPPH-etanol como control. La inhibición se calculó mediante la relación siguiente:

$$\text{Inhibición DPPH (\%)} = [(Ac - Am) / Ac] \times 100$$

Ac corresponde a la absorbancia del control y Am a la de la muestra.

Todas las lecturas se realizaron con el mismo volumen de muestra en la mezcla de reacción. El registro disponible no documenta una normalización por masa seca, por concentración fenólica o por concentración de extracto, ni incluye una curva concentración-respuesta ni una curva estándar de Trolox. Por ello, los porcentajes de inhibición se presentan como respuestas descriptivas bajo las condiciones del ensayo y no como IC_{50}, equivalentes de Trolox o capacidad antioxidante normalizada.

TRATAMIENTO DE LOS DATOS

El análisis se mantuvo en el nivel descriptivo. Los valores consolidados se expresaron con cifras significativas uniformes y se representaron en función del tiempo de fermentación. No se aplicaron ANOVA, modelos mixtos ni otras pruebas inferenciales porque el conjunto documental disponible para la revisión no contiene los registros individuales completos de todas las réplicas para cada variable y cada tiempo. Aplicar estadística inferencial o calcular desviaciones estándar a partir de promedios implicaría introducir una variabilidad no observada. En consecuencia, el texto evita términos como "diferencia significativa" y emplea expresiones como "valor numéricamente mayor" o "valor numéricamente menor".

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

DESARROLLO DEL SCOBY

La formación de SCOBY en ambos tratamientos mostró que ambas matrices mantuvieron actividad fermentativa y desarrollo de biopelícula bajo las condiciones ensayadas. En el control de té verde, el peso húmedo promedio pasó de 63.67 g el día 7 a 107.00 g el día 14. En orujo de uva aumentó de 38.67 g en el día 7 a 53.00 g en el día 12 y descendió a 47.67 g en el día 14. La figura 2 presenta estos valores con el tiempo de fermentación en el eje X y el peso en el eje Y.

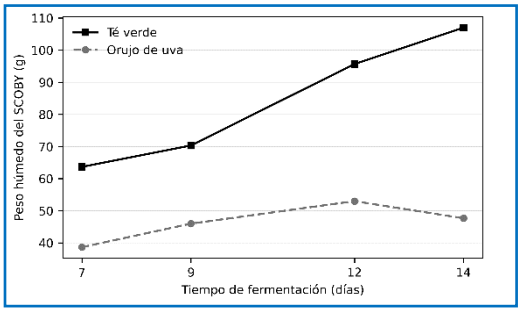


Figura 2. Peso húmedo promedio del SCOBY durante 14 días de fermentación con té verde y orujo de uva. Los valores se presentan de forma descriptiva, sin barras de dispersión debido a la ausencia de registros individuales completos en el conjunto documental revisado.

El menor peso húmedo observado en el tratamiento con orujo no indica una menor tasa de síntesis de celulosa, ya que la masa húmeda incluye celulosa, líquido retenido y material asociado a la biopelícula. Bertsch et al. (2021) mostraron que el crecimiento del biofilm de kombucha cambia con el tiempo y presenta variabilidad en sus primeras etapas. Chong et al. (2024) también relacionaron la dinámica de pH y la formación de biomasa con el tipo de té y las condiciones de fermentación. En este estudio no se determinó la masa seca de celulosa, por lo que el peso debe interpretarse como una medida morfométrica del biofilm húmedo.

El descenso del peso del SCOBY de orujo entre los días 12 y 14 debe interpretarse con cautela. Entre las causas compatibles con una medición de masa húmeda se encuentran cambios en la retención de agua, el desprendimiento de fragmentos durante la manipulación y las variaciones entre las unidades experimentales. El diseño disponible no permite distinguir entre estas alternativas. No se atribuye el descenso a una degradación metabólica específica.

El diámetro fue similar entre los tratamientos durante el seguimiento. En orujo se registraron 7.99, 7.96, 8.08 y 8.20 cm en los días 7, 9, 12 y 14, mientras que el control presentó 7.78, 8.03, 8.09 y 8.20 cm. El grosor mostró una

mayor variación temporal: 1.17, 0.85, 2.44 y 0.42 cm en té verde, frente a 0.74, 0.42, 1.01 y 0.28 cm en orujo. La figura 3 separa ambos parámetros para evitar escalas y ejes ambiguos.

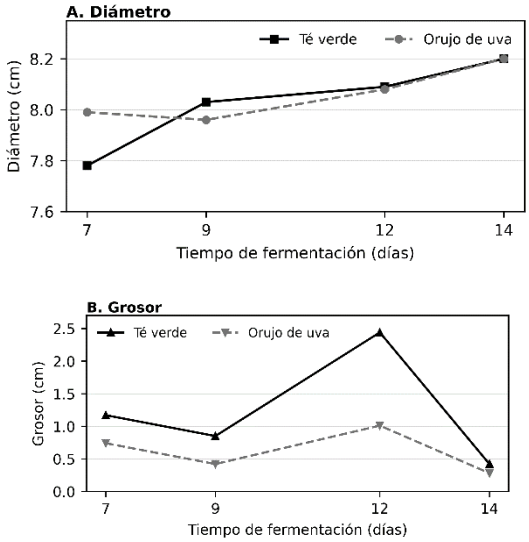


Figura 3. Cambios descriptivos del diámetro (A) y del grosor (B) del SCOBY en té verde y orujo de uva durante los días 7, 9, 12 y 14 de fermentación.

La coincidencia del diámetro final indica que el orujo permitió la expansión superficial del biofilm en el recipiente. El menor peso y el menor grosor numérico frente al té verde sugieren una estructura húmeda distinta, aunque, sin los registros individuales y sin masa seca, no es posible establecer significancia ni atribuir la diferencia a la composición nutricional, a los taninos o a otro componente del sustrato. Estudios con matrices no convencionales confirman que la composición del medio modifica la biomasa, la bioquímica y la respuesta sensorial de kombucha (Bressani et al., 2024; Kilmanoğlu et al., 2024).

PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS

Los registros fisicoquímicos disponibles corresponden a los días 0 y 7. En ambos tratamientos el pH inicial fue 2.46. Después de siete días disminuyó a 2.16 en té verde y 2.17 en orujo. La acidificación es compatible con la producción de ácidos orgánicos propia de la fermentación de kombucha, aunque el pH inicial y la composición posterior también dependen de la formulación y del iniciador (Wang et al., 2022; Alves et al., 2025). La tabla 1 presenta pH, °Brix y acidez con cifras significativas uniformes.

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos de las bebidas de té verde y orujo de uva en los días 0 y 7.

Tratamiento	Día	pH	°Brix	Acidez (%)
Té verde	0	2.46	12.3	0.096
Orujo de uva	0	2.46	11.2	0.120
Té verde	7	2.16	13.2	0.132
Orujo de uva	7	2.17	13.1	0.132

La acidez titulable aumentó de 0.096 % a 0.132 % en el té verde y de 0.120 % a 0.132 % en el orujo. El valor final, igual en ambos tratamientos, indica una convergencia descriptiva de la acidez al día 7. Barakat et al. (2024) observaron la producción de ácidos orgánicos y cambios en la acidez durante fermentaciones de kombucha con orujo. Balmaseda et al. (2024) también documentaron la transformación de orujo de uva en una bebida fermentada, lo que sitúa la acidificación observada dentro del comportamiento esperado de este tipo de proceso.

Los °Brix pasaron de 12.3 a 13.2 en té verde y de 11.2 a 13.1 en orujo entre los días 0 y 7. Este incremento no se interpreta como un aumento de azúcares. El refractómetro responde al índice de refracción total de la muestra y, durante la fermentación, este valor incorpora el efecto combinado de azúcares, ácidos, etanol y otros solutos. Estudios cinéticos de kombucha muestran que los cambios en los sólidos solubles deben analizarse junto con mediciones específicas de carbohidratos y metabolitos (Aung y Eun, 2022; Dartora et al., 2023; Cánovas et al., 2025). La cuantificación de sacarosa, glucosa y fructosa mediante HPLC o métodos enzimáticos sería necesaria para describir el consumo de carbohidratos en esta formulación.

ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE POR INHIBICIÓN DEL RADICAL DPPH

La figura 4 muestra la respuesta al DPPH en los días 0, 7 y 14. El tratamiento de orujo presentó valores numéricamente superiores al del control en los tres tiempos: 93.8 % frente a 82.6 % en el día 0, 73.4 % frente a 51.0 % en el día 7 y 87.1 % frente a 71.5 % en el día 14. Debido a la ausencia de registros individuales completos y de un análisis inferencial, estos resultados se describen como diferencias numéricas y no como diferencias estadísticamente significativas.

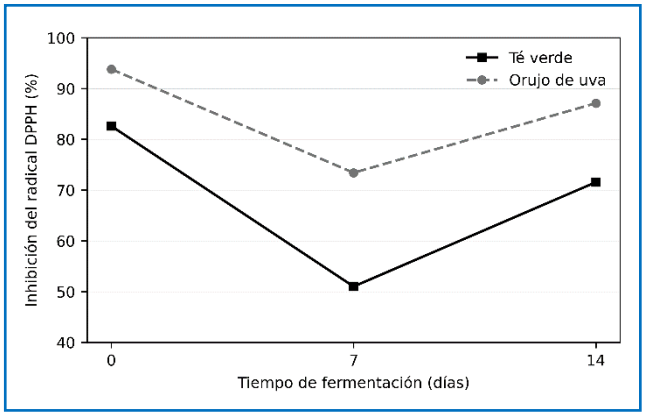


Figura 4. Inhibición descriptiva del radical DPPH en bebidas de té verde y de orujo de uva en los días 0, 7 y 14 de fermentación.

El valor elevado del orujo desde el día 0 es coherente con la presencia conocida de compuestos fenólicos en los subproductos de Vitis vinifera. Mangiapelo et al. (2024) mostraron que las condiciones de procesamiento y extracción modifican la recuperación de la fracción fenólica del orujo. Barakat et al. (2024), Balmaseda et al. (2024) y Cánovas et al. (2025) documentaron el interés por el orujo y otros subproductos enológicos como matrices para bebidas fermentadas con compuestos bioactivos. No obstante, en el presente estudio no se determinaron fenoles totales, flavonoides ni antocianinas, ni se realizó un perfil cromatográfico, por lo que la respuesta DPPH no se atribuye a un compuesto específico.

La reducción de la inhibición al día siete y su recuperación al día catorce describen una trayectoria no lineal. La literatura sobre kombucha describe procesos de hidrólisis, oxidación y transformación de fenoles durante la fermentación, y se han observado cambios en el perfil fenólico de bebidas fermentadas de té (Bortolomedi et al., 2022; de Noronha et al., 2022). En este trabajo, cualquier participación de β-glucosidasas, esterasas, tanasas u oxidorreductasas debe considerarse una hipótesis basada en la literatura, ya que ninguna de esas actividades enzimáticas se midió experimentalmente.

La comparación también está condicionada por el diseño. Después del día 0, ambos tratamientos recibieron 33.3 % v/v de iniciador de kombucha elaborado con té verde. Esa fracción aporta compuestos antioxidantes propios

y dificulta atribuir la respuesta al tratamiento experimental exclusivamente al orujo. La ausencia de controles no fermentados impide separar los efectos de la fermentación, la extracción, la oxidación y el almacenamiento. Asimismo, el ensayo DPPH se realizó con un volumen fijo de muestra, pero sin una concentración normalizada ni una curva dosis-respuesta. Por ello, no se calcularon los IC_{50} ni los equivalentes de Trolox.

ALCANCE Y LIMITACIONES METODOLÓGICAS

Los resultados deben interpretarse como una caracterización exploratoria de dos sistemas fermentados en condiciones definidas. El estudio aporta evidencia de la formación de SCOBY, de la acidificación y de la respuesta antioxidante in vitro en una matriz elaborada con orujo de uva. El alcance no incluye la demostración de la funcionalidad clínica ni de la condición probiótica.

Las principales limitaciones son: ausencia de registros individuales completos para estimar dispersión y realizar estadística inferencial; falta de controles no fermentados; uso de 33.3 % v/v de iniciador de té verde; falta de información sobre variedad de uva y tipo de vinificación; ausencia de cuantificación de azúcares, etanol y ácidos orgánicos; falta de fenoles totales, flavonoides, antocianinas y perfil fenólico; detalles incompletos del fraccionamiento con XAD-7; y falta de normalización por concentración, IC_{50} o equivalentes de Trolox en DPPH. Los valores experimentales de L*, a* y b* no estaban disponibles en el expediente revisado, por lo que se eliminó la representación general del sistema CIE L*a*b* y no se conservaron afirmaciones colorimétricas sin datos que las respaldaran.

Una fase confirmatoria requiere conservar los datos individuales de cada frasco, incluir controles de extracción y de almacenamiento sin SCOBY, cuantificar compuestos fenólicos y metabolitos de fermentación, normalizar los ensayos antioxidantes y aplicar un modelo estadístico acorde con mediciones repetidas. La caracterización microbiológica, incluida la identificación y la viabilidad del consorcio, resulta necesaria antes de discutir las propiedades probióticas.

CONCLUSIONES

Bajo las condiciones evaluadas, la infusión elaborada con orujo de Vitis vinifera favoreció la formación de SCOBY y la acidificación durante una fermentación tipo kombucha. La biomasa húmeda fue menor que en el té verde, mientras que el diámetro final del biofilm fue similar. La respuesta de inhibición de DPPH fue numéricamente superior con el tratamiento con orujo en los tres tiempos analizados, lo que sugiere un potencial antioxidante in vitro. Estas observaciones no permiten atribuir el efecto exclusivamente al orujo ni establecer la significancia estadística, debido al aporte del iniciador de té verde, a la falta de controles no fermentados, a la ausencia de registros individuales completos y a la falta de normalización química del ensayo antioxidante. El estudio sustenta una línea de aprovechamiento del orujo como sustrato fermentable y define las mediciones necesarias para una evaluación confirmatoria.

REFERENCIAS

Alves, R. O., de Oliveira, R. L., de Moraes, M. M., Santos, W. W. V., Gomes da Câmara, C. A., da Silva, S. P., Porto, C. S., & Porto, T. S. (2025). Evaluation of the impact of fermentation conditions, scale up and stirring on physicochemical parameters, antioxidant capacity and volatile compounds of green tea kombucha. *Fermentation*, *11*(4), 201. https://doi.org/10.3390/fermentation11040201

Aung, T., & Eun, J. B. (2022). Impact of time and temperature on the physicochemical, microbiological, and nutraceutical properties of laver kombucha (*Porphyra dentata*) during fermentation. *LWT, 154*, 112643. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112643

Balmaseda, A., Romeu, E., Mas, A., & Portillo, M. C. (2024). Production of grape marc kombucha: Valorization of a wine by-product. *LWT, 210*, 116882. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116882

Barakat, N., Bouajila, J., Beaufort, S., Rizk, Z., Taillandier, P., & El Rayess, Y. (2024). Development of a new kombucha from grape pomace: The impact of fermentation conditions on composition and biological activities. *Beverages, 10*(2), 29. https://doi.org/10.3390/beverages10020029

Bertsch, P., Etter, D., & Fischer, P. (2021). Transient in situ measurement of kombucha biofilm growth and mechanical properties. *Food & Function, 12*(9), 4015–4020. https://doi.org/10.1039/D1FO00630D

Bortolomedi, B. M., Paglarini, C. S., & Brod, F. C. A. (2022). Bioactive compounds in kombucha: A review of substrate effect and fermentation conditions. *Food Chemistry, 385*, 132719. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132719

Bressani, A. P. P., Casimiro, L. K. S., Martinez, S. J., Dias, D. R., & Schwan, R. F. (2024). Kombucha with yam: Comprehensive biochemical, microbiological, and sensory characteristics. *Food Research International, 192,* 114762. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114762

Cánovas, B. M., Pérez-Novas, I., García-Viguera, C., Domínguez-Perles, R., & Medina, S. (2025). Assessment of winery by-products as ingredients as a base of "3S" (safe, salubrious, and sustainable) fermented beverages rich in bioactive anthocyanins. *Foods, 14*(14), 2514. https://doi.org/10.3390/foods14142514

Chong, A. Q., Chin, N. L., Talib, R. A., & Basha, R. K. (2024). Modelling pH dynamics, SCOBY biomass formation, and acetic acid production of kombucha fermentation using black, green, and oolong teas. *Processes*, *12*(7), 1301. https://doi.org/10.3390/pr12071301

Dartora, B., Hickert, L. R., Fabricio, M. F., Ayub, M. A. Z., Furlan, J. M., Wagner, R., Perez, K. J., & Sant'Anna, V. (2023). Understanding the effect of fermentation time on physicochemical characteristics, sensory attributes, and volatile compounds in green tea kombucha. *Food Research International, 174*, 113569. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113569

de Noronha, M. C., Cardoso, R. R., dos Santos D'Almeida, C. T., Vieira do Carmo, M. A., Azevedo, L., Maltarollo, V. G., Ribeiro Júnior, J. I., Eller, M. R., Cameron, L. C., Ferreira, M. S. L., & de Barros, F. A. R. (2022). Black tea kombucha: Physicochemical, microbiological and comprehensive phenolic profile changes during fermentation, and antimalarial activity. *Food Chemistry, 384*, 132515. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132515

Kilmanoglu, H., Cinar, A. Y., & Durak, M. Z. (2024). Evaluation of microbiota-induced changes in biochemical, sensory properties and volatile profile of kombucha produced by reformed microbial community. *Food Chemistry: X*, 22, 101469. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101469

Lopes, J. da C., Madureira, J., Margaça, F. M. A., & Cabo Verde, S. (2025). Grape pomace: A review of its bioactive phenolic compounds, health benefits, and applications. *Molecules, 30*(2), 362. https://doi.org/10.3390/molecules30020362

Mangiapelo, L., Blasi, F., Ianni, F., Suvieri, C., Sardella, R., Volpi, C., & Cossignani, L. (2024). Optimization of a simple analytical workflow to characterize the phenolic fraction from grape pomace. *Food and Bioprocess Technology, 17*(7), 1942–1957. https://doi.org/10.1007/s11947-023-03249-0

Molyneux, P. (2004). The use of the stable free radical diphenylpicrylhydrazyl (DPPH) for estimating antioxidant activity. *Songklanakarin Journal of Science and Technology, 26*(2), 211–219.

Savary, O., Mounier, J., Thierry, A., Poirier, E., Jourdren, J., Maillard, M.-B., Penland, M., Decamps, C., Coton, E., & Coton, M. (2021). Tailor-made microbial consortium for

kombucha fermentation: Microbiota-induced biochemical changes and biofilm formation. *Food Research International, 147*, 110549. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110549

Wang, B., Rutherfurd-Markwick, K., Zhang, X.-X., & Mutukumira, A. N. (2022). Kombucha: Production and microbiological research. *Foods, 11*(21), 3456. https://doi.org/10.3390/foods11213456

Zhang, J., Ma, H., Wang, H., Sun, M., Yu, C., Liu, Q., He, Z., Song, S., Feng, T., & Yao, L. (2024). Flavor and sensory profile of kombucha fermented with raw Pu-erh tea and evaluation of the antioxidant properties. *LWT, 200*, 116220. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116220

MICROAGUJAS INTELIGENTES: EL FUTURO DE LA LIBERACIÓN TRANSDÉRMICA DE FÁRMACOS

SMART MICRONEEDLES: THE FUTURE OF TRANSDERMAL DRUG DELIVERY

RIVERA ESCOBEDO, Luis Antonio

MELÉNDEZ ORTÍZ, Héctor Iván

BETANCOURT GALINDO, Rebeca

Centro de Investigación en Química Aplicada. Saltillo, Coahuila, México.

RESUMEN

Los parches de microagujas han surgido como un área prometedora en la investigación biomédica, debido a su capacidad de administrar una amplia variedad de fármacos, vacunas y otras sustancias a través de la piel, minimizando el dolor y daño causados por las agujas hipodérmicas. En contraste con las rutas tradicionales como la intravenosa y la oral, las microagujas ofrecen una administración indolora, no invasiva y de fácil autoadministración; además, pueden mejorar la biodisponibilidad de determinados fármacos al evitar el metabolismo hepático de primer paso, asegurando una liberación gradual al torrente sanguíneo que resulta en una menor frecuencia de administración. Estos parches de microagujas, fabricados generalmente a partir de materiales biocompatibles y biodegradables, se subdividen en activos, que permiten controlar la liberación de sustancias mediante estímulos externos, y pasivos, que carecen de esta capacidad. Entre los distintos tipos de microagujas, destacan las de tipo hidrogel, formadas por polímeros inteligentes entrecruzados que forman una red capaz de absorber agua, hincharse y liberar el fármaco en respuesta a diversos estímulos externos como cambios en pH, temperatura, luz, magnetismo, etc., y cuya respuesta puede ser regulada ajustando su composición y grado de entrecruzamiento. Esta revisión tiene como objetivo destacar el potencial de esta tecnología como un sistema novedoso, biocompatible y seguro para la encapsulación de fármaco en dosis terapéuticas, y su liberación controlada ante cambios fisiológicos como el pH, para tratamientos alternativos a enfermedades como melanoma, así como discutir los desafíos actuales y las potenciales aplicaciones en biomedicina.

Palabras clave: microagujas; hidrogeles; estímulo responsividad; liberación de fármaco.

Correspondencia
luis.rivera.d23@ciqa.edu.mx
https://orcid.org/0009-0004-3837-3360

Fecha de recepción
12 de septiembre de 2025.
Fecha de aceptación
20 de junio de 2026.

Este artículo fue sometido a revisión por pares doble ciego

ABSTRACT

Microneedle patches have emerged as a promising area of biomedical research due to their ability to deliver a wide range of drugs, vaccines, and other substances through the skin, thereby minimizing the pain and damage associated with hypodermic needles. In contrast to traditional administration routes such as intravenous and oral, microneedles offer a painless, non-invasive, and easily self-administered alternative. Additionally, drug loss is minimized by preventing it from breaking down in the liver before reaching the bloodstream, ensuring a gradual release into circulation and resulting in less frequent dosing. These patches, made from biocompatible and biodegradable materials, can be classified as active (which allow controlled substance release in response to external stimuli), or passive (which lack this responsiveness). Among the various types of microneedles, hydrogel-based microneedles composed of crosslinked hydrophilic polymers stand out for their ability to form a water-absorbing, swelling network that releases drugs in response to external stimuli such as changes in pH, temperature, light, or magnetic fields. Moreover, their responsiveness can be tuned by adjusting their composition and degree of crosslinking. This review aims to highlight the potential of this technology as a novel, biocompatible, and safe system for drug encapsulation at therapeutic doses, and its controlled release triggered by physiological changes such as pH, offering alternative treatments for diseases like melanoma, as well as to discuss current challenges and potential applications in the biomedical field.

Key words: *microneedles; hydrogels; stimuli-responsiveness; drug release.*

INTRODUCCIÓN

El cáncer de piel es la forma más común de cáncer a nivel mundial y se clasifica principalmente en carcinoma basocelular, carcinoma espinocelular y melanoma. Siendo este último el menos frecuente, pero considerablemente más letal, responsable de hasta el 80 % de las muertes en pacientes diagnosticados (Chatzilakou et al., 2024). En el estado de Coahuila, el cáncer constituye la tercera causa de muerte, con el 15 % del total de fallecimientos en la entidad, de los cuales el 49 % corresponde a hombres y el 51 % a mujeres (INEGI, 2025). Aunque los tipos de cáncer más comunes en la región son el cáncer de mama, pulmonar y colorrectal, la constante exposición a radiación ultravioleta (un factor de riesgo clave para el cáncer de piel)

incrementa la vulnerabilidad de la población coahuilense al melanoma. Uno de los tratamientos convencionales más utilizados para combatir el melanoma es la quimioterapia; sin embargo, las rutas de administración predominantes, como la oral y la intravenosa, suelen asociarse con efectos adversos graves, como la cardiotoxicidad y la neurotoxicidad (Cassano et al., 2021; Mantilla Rosa et al., 2024). Para afrontar estas limitaciones, la administración tópica o transdérmica ha surgido como una alternativa terapéutica, con la capacidad de reducir la toxicidad sistémica y enfocar la acción del fármaco en el sitio afectado (Bakhrushina et al., 2025; Crasta et al., 2025). Un ejemplo de ello es la tecnología de microagujas, que se ha consolidado como un innovador método de liberación transdérmica de fármacos (Kaur et al., 2025; Wu et al., 2024). A diferencia de las agujas hipodérmicas, las microagujas son más pequeñas que el grosor de una moneda, permitiéndoles penetrar únicamente en la capa epidérmica sin alcanzar vasos sanguíneos ni terminaciones nerviosas de la dermis, reduciendo significativamente el dolor, evitando el sangrado y disminuyendo el riesgo de infección (Jung y Jin, 2021; Lyu et al., 2023; Zhang et al., 2024). Entre los diferentes tipos de microagujas, aquellas fabricadas a partir de hidrogeles ofrecen ventajas adicionales; estos sistemas biocompatibles y seguros permiten la incorporación de fármacos en dosis determinadas y su liberación es mediada por cambios en la temperatura y pH, lo que las convierte en una alternativa atractiva para aplicaciones biomédicas (Turner et al., 2021).

EL MELANOMA

El melanoma es la forma más agresiva de cáncer de piel, y se produce como resultado de interacciones entre factores genéticos y ambientales, siendo el sol el principal factor de riesgo, debido a que, cuando ciertas células de la piel son expuestas a la radiación UV, ocurre una acumulación de mutaciones genéticas que propician la formación de tumores y, finalmente, melanoma (Adamson et al., 2022). De acuerdo con datos del SINBA (Sistema Nacional de Información Básica en Materia de Salud), la tasa de mortalidad por melanoma en México ha incrementado constantemente durante 23 años consecutivos (1998-2022), casi duplicándose en ese periodo, siendo 2018 el año con la tasa más alta registrada en nuestro país, de $0.61x10^5$. El melanoma es altamente curable cuando se diagnostica y se trata en etapas tempranas, por lo que la prevención de los factores de riesgo es prioritaria para la población (Domínguez et al., 2023; Sung et al., 2021). Existen diferentes tratamientos para el melanoma, como la cirugía, la radioterapia, la quimioterapia y la inmunoterapia, pero su efectividad depende de la etapa en

la que se diagnostique. Además, estos tratamientos pueden causar efectos secundarios que afectan la calidad de vida del paciente, como cambios en el color de la piel, pérdida de vello corporal en el lugar de la aplicación, tos, náuseas, vómitos, pérdida del apetito, diarrea, estreñimiento, hemorragias, debilidad, etc. Debido a lo anterior, surgen nuevas alternativas de tratamiento menos invasivas, menos dolorosas y más eficaces que mejoran la calidad de vida de los pacientes (Shajari et al., 2024; Zhao et al., 2023).

PARCHES DE MICROAGUJAS

Una administración de fármacos transdérmica se logra mediante parches adhesivos, que liberan una cantidad efectiva de fármaco al torrente sanguíneo a través de la piel (Xue et al., 2024). Un ejemplo de esto es la tecnología de microagujas, que consiste en agujas micrométricas agrupadas en una base sólida o parche que permite la encapsulación y la liberación de moléculas justo debajo de la epidermis. Además, presenta ventajas como una aplicación indolora, una liberación focalizada, la minimización de efectos colaterales, un bajo costo, la biocompatibilidad y la biodegradabilidad. Al aplicarse, las microagujas atraviesan la epidermis y, posteriormente, se libera el fármaco mediante procesos de difusión. Finalmente, el fármaco llega al torrente sanguíneo y ejerce un efecto terapéutico en el sitio a tratar (figura 1) (Chong et al., 2013).

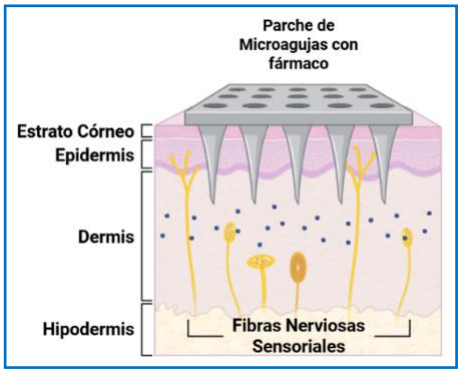


Figura 5. Representación esquemática de un parche de microagujas cargado con fármaco aplicado sobre la piel.

Las microagujas pueden diseñarse y desarrollarse de acuerdo con el uso y necesidades; su principal clasificación se basa en su enfoque de liberación: sólidas, recubiertas, base hidrogel, huecas y solubles. Desde un punto de vista general, todos los tipos de microagujas presentan características adecuadas para la administración transdérmica de fármacos; sin embargo, cada una presenta limitaciones para su aplicación eficiente. Esta comparación se resume en la tabla 1.

Tabla 1. Ventajas y desventajas para los diferentes tipos de microagujas

Tipo	Ventajas	Desventajas
Sólidas	• Fabricación sencilla. • Sin procedimiento de carga o recubrimiento. • Administración de pequeñas dosis.	• Dosificación inexacta.
Recubiertas	• Mantienen su resistencia tras el recubrimiento. • Permite una dosificación precisa.	• Se limita a pequeñas dosis. • Disminuye lo punzante de las microagujas.
Solubles	• Dosificación precisa. • No genera residuos punzocortantes. • Bajos costos de fabricación.	• Pequeñas dosis de fármacos podrían perderse durante su fabricación. • Baja capacidad de penetración de piel.
Huecas	• La administración de fármacos es gradual. • Es posible administrar una cantidad relativamente grande de líquido. • Dosificación precisa.	• Posible riesgo de obstrucción. • Microagujas menos rígidas.
Base hidrogel	• Dosificación precisa. • La administración de fármacos es gradual. • No genera residuos punzocortantes. • Capacidad de responder a estímulos externos.	• Pequeñas cantidades de fármacos podrían perderse durante su fabricación. • Se limita a pequeñas dosis. • Baja capacidad de penetración en la piel. • Microagujas menos rígidas.

Nota: adaptado de Luo et al. (2023).

MICROAGUJAS DE BASE HIDROGEL

Las microagujas de base hidrogel fueron reportadas por primera vez por Donnelly et al. (2012) y constituyen una de las variantes desarrolladas más recientemente. Estas se fabrican a partir de polímeros hidrofílicos entrecruzados (naturales o sintéticos), que presentan un alto grado de flexibilidad por su capacidad de hinchamiento, lo que les permite absorber grandes cantidades de agua o fluidos biológicos. En estado seco, son lo suficientemente resistentes como para penetrar la epidermis y convertirse en un hidrogel hinchado al entrar en contacto con fluidos. Este sistema presenta ventajas como una mayor capacidad de carga de fármaco, una tasa de liberación ajustable y precisa, así como una excelente biocompatibilidad y biodegradabilidad (Duarah et al., 2019).

Es importante considerar que los materiales seleccionados para la fabricación de estos sistemas deben ser biocompatibles, ya que las microagujas atraviesan

la barrera protectora de la piel y, en caso de que sufrieran daño estructural durante su uso, los fragmentos resultantes no afectarían la salud del paciente. Los polímeros naturales biodegradables como las proteínas y los polisacáridos han sido utilizados en la fabricación de hidrogeles y regularmente estos son preferidos sobre los sintéticos debido a su bajo costo, biodegradabilidad, biocompatibilidad y no toxicidad. Además, este tipo de polímeros posee una estructura química que les permite atraer fácilmente moléculas de agua, lo que los hace ideales para la fabricación de hidrogeles (Raina et al., 2022).

Sin embargo, también presentan limitaciones, como la dificultad de purificación y las bajas propiedades mecánicas. Por ello, para aprovechar sus ventajas y superar estas limitaciones, los polímeros naturales se combinan con polímeros sintéticos para formar hidrogeles híbridos que presentan propiedades mejoradas y nuevas. Esta combinación es posible gracias a la copolimerización de un monómero natural y uno sintético (Vázquez González y Willner, 2020). Dependiendo de su composición, algunos hidrogeles híbridos pueden variar su porcentaje de hinchamiento en respuesta a determinados estímulos; con estos hidrogeles es posible regular y ajustar la liberación del fármaco en función de las condiciones ambientales. Estos materiales sufren un cambio de conformación en respuesta a estímulos externos como la temperatura, el pH, la luz, la fuerza iónica y el campo magnético (figura 2).

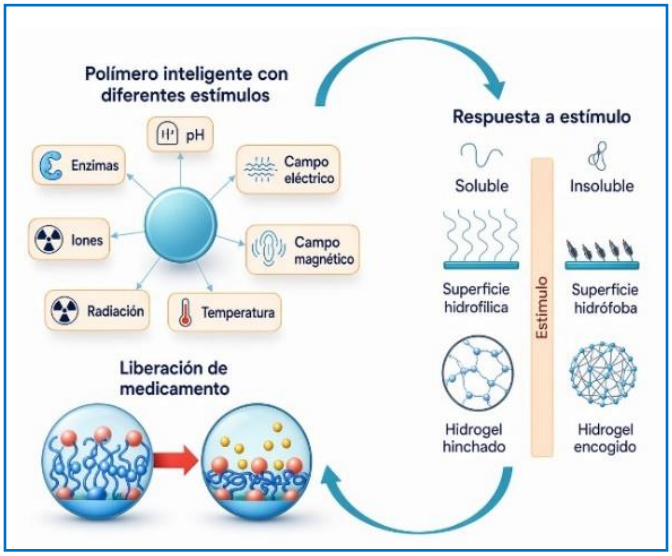


Figura 2. Polímero inteligente sensible a estímulos que controla su solubilidad, hidrofilicidad e hinchamiento para la liberación de fármacos.

Esto puede ser aprovechado en aplicaciones biomédicas; por ejemplo, las células cancerígenas se caracterizan por una acidificación del entorno, por lo que los hidrogeles sensibles a cambios de pH son una alternativa para la liberación de fármaco quimioterapéutico en un área focalizada, reduciendo los efectos adversos en tejido sano (Vegad et al., 2023). Para crear estos hidrogeles, pueden introducirse grupos ionizables como aminas, ácidos carboxílicos, iminas, etc. en su estructura. Dependiendo del pH del entorno, estos grupos pueden donar o aceptar protones, lo que altera sus propiedades físicas y químicas. Los hidrogeles catiónicos aumentan su hinchamiento a valores de pH debajo de su pKa (un valor que indica a qué pH un grupo químico va a aceptar o donar un protón), debido a una protonación de sus grupos funcionales y consecuente repulsión electrostática entre las cadenas poliméricas. Por el contrario, los hidrogeles aniónicos se hinchan a valores de pH por encima de su pKa debido a la ionización de los grupos acídicos y repulsión de las cadenas (figura 3) (Simeonov et al., 2025). Esta manipulación del hinchamiento del hidrogel permite controlar la liberación del fármaco que contiene (Lin et al., 2020).

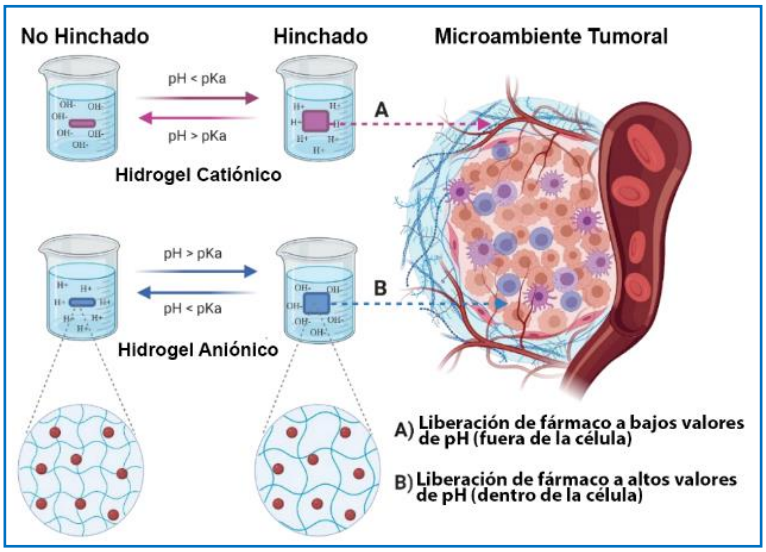


Figura 3. Representación esquemática del hinchamiento de hidrogeles pH-responsivos.
Nota. Adaptado de Andrade et al. (2021).

APLICACIONES DE LAS MICROAGUJAS DE BASE HIDROGEL EN BIOMEDICINA

Las microagujas tienen un gran potencial en biomedicina tanto en terapia como en diagnóstico. El uso de microagujas ha permitido la administración transdérmica de muchos fármacos, como metformina, lidocaína, insulina y vacunas, entre otros, para el tratamiento de heridas (acné) (Zhang et al.,

2020), diabetes (Ye et al., 2016) y tumores (Chen et al., 2020). Algunas de las aplicaciones potenciales de estos materiales se enumeran a continuación:

a) Reparación de heridas: han sido utilizados para provocar puntos de sangrado uniformes en la piel y crear múltiples microhematomas, que desencadenan una cascada de factores de crecimiento que conduce a la producción de colágeno, su conversión a colágeno tipo I y, por consiguiente, a la reparación de heridas (Barnum et al., 2020).
b) Terapia para la diabetes: es posible utilizar microagujas para la liberación controlada de insulina. Esta administración continua podría controlar con precisión los niveles deseados de glucosa durante periodos prolongados (Lu et al., 2023).
c) Terapia para el cáncer: las microagujas pueden utilizarse para el tratamiento de tumores superficiales, el encapsulamiento de fármacos anticáncer y su liberación controlada. Ofrecen una alternativa menos invasiva y con menos efectos secundarios que los tratamientos convencionales (Lan et al., 2020).
d) Vacunación: el uso de microagujas no solo reduciría costos, sino que también aseguraría una mejor respuesta inmune gracias a la administración sostenida (Menon et al., 2021).
e) Terapia para el dolor: parches de microagujas cargados con lidocaína con acción analgésica para el tratamiento de dolor crónico post operatorio o causado por trauma (Liu et al., 2023).
f) Monitoreo de enfermedades: la evaluación continua de biomarcadores específicos presentes en el fluido intersticial es crítica para el manejo efectivo de enfermedades crónicas y para modificar su tratamiento. Las microagujas de base hidrogel pueden ser utilizadas en extracción de fluido intersticial, debido a su buena capacidad de inserción en piel y naturaleza de hinchamiento (Yang et al., 2024).

Diversos estudios han evaluado el potencial de los parches de microagujas de base hidrogel para aplicaciones biomédicas. La tabla 2 presenta antecedentes sobre el uso de parches de microagujas como tratamientos alternativos para diversas enfermedades. Estos trabajos son un ejemplo del impacto que generan en el ámbito biomédico como solución innovadora a los desafíos médicos actuales.

Tabla 2. Trabajos previos sobre microagujas de hidrogel para liberación controlada de fármacos.

Tipo de sistema	Fármaco Encapsulado	Enfermedad Tratada	Resultados sobresalientes	Referencia
Gel/MA con PVA	Hidrocloruro de donepezilo	Alzheimer	• Liberación eficaz *in vitro*. • No causó inflamación. • Alta velocidad de administración de fármaco.	(Zhao et al., 2022)
PEG con PMVE/MA y Na_2CO_3	Aciclovir	Infecciones virales	• Buena penetración en piel. • Alto contenido de fármaco. • Frecuencia de administración disminuida a 1 vez al día.	(Al-Badry et al., 2023)
PVP/DMAEA/ EGDMA/ ácido fenilborónico	Insulina	Diabetes Tipo 2	• Glucosa-sensible. • Regulación de la glucosa durante más de 20 h. • En hiperglucemia, se promovió su liberación.	(Yu et al., 2020)
DexMA/ GMA	DOX/Tra	Melanoma	• Biocompatible y seguro. • Efecto antitumoral. • Reducción de efectos secundarios.	(Huang et al., 2020)
PNIPAm/ Gelatina	Insulina	Diabetes Tipo 2	• Sistema termorresponsivo. • Tiempo de aplicación de 2 h. • La temperatura permitió ajustar la liberación.	(Li et al., 2022)
GelMA/ CMC-pHEA	Insulina	Diabetes Tipo 1	• Sistema dual responsivo a pH y glucosa. • Hinchamiento a pH bajo y liberación de insulina. • Biodegradable.	(Wang et al., 2023)

Abreviaturas: GelMA (gelatina metacrilada); PVA alcohol polivinílico; PEG poli (etilen glicol); PMVE/MA poli (metil vinil éter-co-ácido maleico); Na2CO3 (carbonato de sodio); PVP poli (vinil pirrolidona); DMAEA (acrilato de dimetilaminoetilo); EGDMA (dimetacrilato de etilenglicol); DexMA (Dextrano metacrilado); GMA (metacrilato de glicidilo); PNIPAm poli (N-isopropil acrilamida); CMC-pHEA (copolímero de carboximetil celulosa y poli (acrilato de 2-hidroxietilo)).

DESAFÍOS FUTUROS

Los parches de microagujas se han consolidado como una tecnología innovadora para la administración transdérmica de fármacos en el tratamiento de diversas enfermedades. Sin embargo, estos dispositivos también presentan limitaciones y desafíos, como el costo elevado y la posibilidad de desplazarse de su posición original debido a los movimientos del paciente. Otro desafío es la irritación o inflamación de la piel por la aplicación repetida en la misma zona. Asegurar que el fármaco encapsulado mantenga su estabilidad y eficacia durante su uso es un aspecto crítico para su aplicación exitosa. El diseño de las microagujas desempeña un papel clave

en la eficiencia del tratamiento, ya que su geometría y dimensiones deben permitir una adecuada carga de la sustancia activa y garantizar su liberación en el sitio deseado. Aunque se han realizado numerosas investigaciones, patentes y ensayos clínicos, todavía persisten desafíos relacionados con la seguridad de los materiales, su biocompatibilidad y la especificidad de su aplicación. Diversas técnicas de fabricación permiten producir estos parches, pero aún es necesario perfeccionar métodos que aseguren una liberación precisa, con dosis controladas y una estabilidad prolongada.

CONCLUSIONES

En el futuro, la tecnología de microagujas podría revolucionar la prevención, el diagnóstico y el tratamiento de enfermedades, mejorando la calidad de vida de las personas en todo el mundo. La eficiencia en la administración de fármacos mediante parches de microagujas depende de factores como la longitud y la geometría de las microagujas, el material de las microagujas, la concentración del fármaco, la duración de la aplicación y la hidratación de la piel del paciente. Sin embargo, el factor más crítico es su capacidad para atravesar la epidermis, ya que sin una penetración adecuada el fármaco no llega al tejido y la dosis administrada se reduce. El interés de la investigación biomédica se ha centrado en el desarrollo de mecanismos de liberación de fármacos activados o regulados en función de nuestras necesidades. Los avances en los sistemas basados en microagujas están transformando la forma en que se administran los fármacos, así como los métodos de detección y seguimiento de diversas enfermedades, abriendo el camino hacia tratamientos más seguros, eficaces y accesibles para los pacientes.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT, México) por el apoyo financiero (No. de apoyo 848744). H. Iván Meléndez-Ortiz agradece al programa Investigadores por México-SECIHTI. Los autores agradecen a CONAHCYT (Proyecto No. 6725).

REFERENCIAS

Adamson, A. S., Welch, H., & Welch, H. G. (2022). Association of UV radiation exposure, diagnostic scrutiny, and melanoma incidence in US counties. *JAMA Internal Medicine, 182*(11), 1181–1189. https://doi.org/10.1001/jamainternmed.2022.4342

Al-Badry, A. S., Al-Mayahy, M. H., & Scurr, D. J. (2023). Enhanced transdermal delivery of acyclovir via hydrogel microneedle arrays. *Journal of Pharmaceutical Sciences, 112*(4), 1011–1019. https://doi.org/10.1016/j.xphs.2022.11.012

Andrade, F., Roca-Melendres, M. M., Durán-Lara, E. F., Rafael, D., & Schwartz, S., Jr. (2021). Stimuli-responsive hydrogels for cancer treatment: The role of pH, light, ionic strength and magnetic field. *Cancers, 13*(5), 1164. https://doi.org/10.3390/cancers13051164

Bakhrushina, E. O., Shumkova, M. M., Avdonina, Y. V., Ananian, A. A., Babazadeh, M., Pouya, G., Grikh, V. V., Zubareva, I. M., Kosenkova, S. I., Krasnyuk, I. I., Jr., & Krasnyuk, I. I. (2025). Transdermal drug delivery systems: Methods for enhancing skin permeability and their evaluation. *Pharmaceutics, 17*(7), 936. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics17070936

Barnum, L., Samandari, M., Schmidt, T. A., & Tamayol, A. (2020). Microneedle arrays for the treatment of chronic wounds. *Expert Opinion on Drug Delivery, 17*(12), 1767–1780. https://doi.org/10.1080/17425247.2020.1819787

Cassano, R., Cuconato, M., Calviello, G., Serini, S., & Trombino, S. (2021). Recent advances in nanotechnology for the treatment of melanoma. *Molecules, 26*(4), 785. https://doi.org/10.3390/molecules26040785

Chatzilakou, E., Hu, Y., Jiang, N., & Yetisen, A. K. (2024). Biosensors for melanoma skin cancer diagnostics. *Biosensors and Bioelectronics, 250*, 116045. https://doi.org/10.1016/j.bios.2024.116045

Chen, M., Quan, G., Wen, T., Yang, P., Qin, W., Mai, H., Sun, Y., Lu, C., Pan, X., & Wu, C. (2020). Cold to hot: Binary cooperative microneedle array-amplified photoimmunotherapy for eliciting antitumor immunity and the abscopal effect. *ACS Applied Materials & Interfaces, 12*(29), 32259–32269. https://doi.org/10.1021/acsami.0c05090

Chong, R. H. E., Gonzalez-Gonzalez, E., Lara, M. F., Speaker, T. J., Contag, C. H., Kaspar, R. L., Coulman, S. A., Hargest, R., & Birchall, J. C. (2013). Gene silencing following siRNA delivery to skin via coated steel microneedles: In vitro and in vivo proof-of-concept. *Journal of Controlled Release, 166*(3), 211–219. https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2012.12.030

Crasta, A., Painginkar, T., Sreedevi, A., Pawar, S. D., Badamane Sathyanarayana, M., Vasantharaju, S. G., Osmani, R. A. M., & Ravi, G. (2025). Transdermal drug delivery

system: A comprehensive review of innovative strategies, applications, and regulatory perspectives. *OpenNano, 24*, 100245. https://doi.org/10.1016/j.onano.2025.100245

Hernández-Domínguez, D. A., Aldaco-Sarvide, F., Cervantes-Sánchez, G., Torrecillas-Torres, L., & Mendoza Balderas, A. (2023). Mortality patterns of melanoma in Mexico over the last 2 decades. *Medical Research Archives, 11*(2). https://doi.org/10.18103/mra.v11i2.2842

Donnelly, R. F., Singh, T. R. R., Garland, M. J., Migalska, K., Majithiya, R., McCrudden, C. M., Kole, P. L., Mahmood, T. M. T., McCarthy, H. O., & Woolfson, A. D. (2012). Hydrogel-forming microneedle arrays for enhanced transdermal drug delivery. *Advanced Functional Materials, 22*(23), 4879–4890. https://doi.org/10.1002/adfm.201200864

Duarah, S., Sharma, M., & Wen, J. (2019). Recent advances in microneedle-based drug delivery: Special emphasis on its use in paediatric population. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, 136*, 48–69. https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2019.01.005

Huang, S., Liu, H., Huang, S., Fu, T., Xue, W., & Guo, R. (2020). Dextran methacrylate hydrogel microneedles loaded with doxorubicin and trametinib for continuous transdermal administration of melanoma. *Carbohydrate Polymers, 246*, 116650. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116650

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2025, 25 de febrero). *Estadísticas de defunciones registradas (EDR)*. INEGI — Estadísticas de defunciones registradas

Jung, J. H., & Jin, S. G. (2021). Microneedle for transdermal drug delivery: Current trends and fabrication. *Journal of Pharmaceutical Investigation, 51*(5), 503–517. https://doi.org/10.1007/s40005-021-00512-4

Kaur, S. D., Choudhary, S., Sen, S., Pemmaraju, D. B., Singh, S. K., & Kapoor, D. N. (2025). Microneedle patches: The next frontier in cardiovascular care. *Drug Delivery and Translational Research, 15*(9), 2951–2966. https://doi.org/10.1007/s13346-025-01802-2

Lan, X., Zhu, W., Huang, X., Yu, Y., Xiao, H., Jin, L., Pu, J. J., Xie, X., She, J., Lui, V. W. Y., Chen, H.-J., & Su, Y.-X. (2020). Microneedles loaded with anti-PD-1–cisplatin nanoparticles for synergistic cancer immuno-chemotherapy. *Nanoscale, 12*(36), 18885–18898. https://doi.org/10.1039/D0NR04213G

Li, J. Y., Feng, Y. H., He, Y. T., Hu, L. F., Liang, L., Zhao, Z. Q., Chen, B. Z., & Guo, X. D. (2022). Thermosensitive hydrogel microneedles for controlled transdermal drug delivery. *Acta Biomaterialia, 153*, 308–319. https://doi.org/10.1016/j.actbio.2022.08.061

Lin, X., Miao, L., Wang, X., & Tian, H. (2020). Design and evaluation of pH-responsive hydrogel for oral delivery of amifostine and study on its radioprotective effects.

Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 195, 111200. https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2020.111200

Liu, J., Hu, A., Yang, Y., Huang, S., Mao, J., Liu, Y., Chen, C., Cheng, Z., & Liu, W. (2023). Recent advances and perspectives of microneedles as transdermal delivery vehicles for analgesic medications. *Journal of Drug Delivery Science and Technology, 84*, 104518. https://doi.org/10.1016/j.jddst.2023.104518

Lu, Y., Yu, H., Wang, L., Shen, D., & Liu, J. (2023). Preparation of phenylboronic acid-based glucose-responsive hydrogels and microneedles for regulated delivery of insulin. *European Polymer Journal, 192*, 112061. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2023.112061

Luo, X., Yang, L., & Cui, Y. (2023). Microneedles: Materials, fabrication, and biomedical applications. *Biomedical Microdevices, 25*(3), 20. https://doi.org/10.1007/s10544-023-00658-y

Lyu, S., Dong, Z., Xu, X., Bei, H.-P., Yuen, H.-Y., Cheung, C.-W. J., Wong, M.-S., He, Y., & Zhao, X. (2023). Going below and beyond the surface: Microneedle structure, materials, drugs, fabrication, and applications for wound healing and tissue regeneration. *Bioactive Materials, 27*, 303–326. https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2023.04.003

Mantilla Rosa, C., Vancheswaran, A., & Ariyan, C. E. (2024). T-cell immunotherapy for melanoma. *Surgical Oncology, 57*, 102160. https://doi.org/10.1016/j.suronc.2024.102160

Menon, I., Bagwe, P., Gomes, K. B., Bajaj, L., Gala, R., Uddin, M. N., D'Souza, M. J., & Zughaier, S. M. (2021). Microneedles: A new generation vaccine delivery system. *Micromachines, 12*(4), 435. https://doi.org/10.3390/mi12040435

Raina, N., Pahwa, R., Thakur, V. K., & Gupta, M. (2022). Polysaccharide-based hydrogels: New insights and futuristic prospects in wound healing. *International Journal of Biological Macromolecules, 223*, 1586–1603. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.11.115

Shajari, N., Baradaran, B., Tohidkia, M. R., Nasiri, H., Sepehri, M., Setayesh, S., & Aghebati-Maleki, L. (2024). Advancements in melanoma therapies: From surgery to immunotherapy. *Current Treatment Options in Oncology, 25*(8), 1073–1088. https://doi.org/10.1007/s11864-024-01239-8

Simeonov, M., Yildirim, I., Tzachev, C. T., & Vassileva, E. (2025). Stimuli-responsive hydrogels of poly(methacrylic acid)/poly(N,N-dimethylacrylamide) interpenetrating polymer networks as drug delivery systems for promethazine hydrochloride. *Gels, 11*(4), 240. https://doi.org/10.3390/gels11040240

Sung, H., Ferlay, J., Siegel, R. L., Laversanne, M., Soerjomataram, I., Jemal, A., & Bray, F. (2021). Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA: A Cancer Journal for Clinicians, 71*(3), 209–249. https://doi.org/10.3322/caac.21660

Turner, J. G., White, L. R., Estrela, P., & Leese, H. S. (2021). Hydrogel-forming microneedles: Current advancements and future trends. *Macromolecular Bioscience, 21*(2), 2000307. https://doi.org/10.1002/mabi.202000307

Vázquez-González, M., & Willner, I. (2020). Stimuli-responsive biomolecule-based hydrogels and their applications. *Angewandte Chemie International Edition, 59*(36), 15342–15377. https://doi.org/10.1002/anie.201907670

Vegad, U., Patel, M., Khunt, D., Zupančič, O., Chauhan, S., & Paudel, A. (2023). pH stimuli-responsive hydrogels from non-cellulosic biopolymers for drug delivery. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 11*, 1270364. https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1270364

Wang, Y., Liu, H., Yang, X., Shi, Z., Li, J., Xue, L., Liu, S., & Lei, Y. (2023). A responsive hydrogel-based microneedle system for minimally invasive glucose monitoring. *Smart Materials in Medicine, 4*, 69–77. https://doi.org/10.1016/j.smaim.2022.07.006

Wu, C., Yu, Q., Huang, C., Li, F., Zhang, L., & Zhu, D. (2024). Microneedles as transdermal drug delivery system for enhancing skin disease treatment. *Acta Pharmaceutica Sinica B, 14*(12), 5161–5180. https://doi.org/10.1016/j.apsb.2024.08.013

Xue, Y., Chen, C., Mi, X., Tan, R., Wang, J., Wu, S., Wang, Y., Xiong, R., Chen, M., Tan, W.-Q., & Lu, H. (2024). Transdermal drug delivery system: Current status and clinical application of microneedles. *ACS Materials Letters, 6*(3), 801–821. https://doi.org/10.1021/acsmaterialslett.3c01317

Yang, G. R., Kim, W., & Jung, J. H. (2024). Sliding microneedle-lateral flow immunoassay strip device for highly sensitive biomarker detection in interstitial fluid. *Biosensors and Bioelectronics, 263*, 116590. https://doi.org/10.1016/j.bios.2024.116590

Ye, Y., Yu, J., Wang, C., Nguyen, N.-Y., Walker, G. M., Buse, J. B., & Gu, Z. (2016). Microneedles integrated with pancreatic cells and synthetic glucose-signal amplifiers for smart insulin delivery. *Advanced Materials, 28*(16), 3115–3121. https://doi.org/10.1002/adma.201506025

Yu, J., Wang, J., Zhang, Y., Chen, G., Mao, W., Ye, Y., Kahkoska, A. R., Buse, J. B., Langer, R., & Gu, Z. (2020). Glucose-responsive insulin patch for the regulation of blood glucose in mice and minipigs. *Nature Biomedical Engineering, 4*(5), 499–506. https://doi.org/10.1038/s41551-019-0508-y

Zhang, Q., Liu, X., & He, J. (2024). Applications and prospects of microneedles in tumor drug delivery. *Journal of Materials Chemistry B, 12*(14), 3336–3355. https://doi.org/10.1039/D3TB02646A

Zhang, T., Sun, B., Guo, J., Wang, M., Cui, H., Mao, H., Wang, B., & Yan, F. (2020). Active pharmaceutical ingredient poly(ionic liquid)-based microneedles for the treatment of skin acne infection. *Acta Biomaterialia, 115*, 136–147. https://doi.org/10.1016/j.actbio.2020.08.023

Zhao, J., Gao, N., Xu, J., Zhu, X., Ling, G., & Zhang, P. (2023). Novel strategies in melanoma treatment using silver nanoparticles. *Cancer Letters, 561*, 216148. https://doi.org/10.1016/j.canlet.2023.216148

Zhao, Z. Q., Liang, L., Hu, L. F., He, Y. T., Jing, L. Y., Liu, Y., Chen, B. Z., & Guo, X. D. (2022). Subcutaneous implantable microneedle system for the treatment of Alzheimer's disease by delivering donepezil. *Biomacromolecules, 23*(12), 5330–5339. https://doi.org/10.1021/acs.biomac.2c01155

UNA APLICACIÓN DE S_3 EN LA CONSTRUCCIÓN DE LA MATRIZ DE MASA PARA LEPTONES CARGADOS

AN APPLICATION OF S_3 IN THE CONSTRUCTION OF THE MASS MATRIX FOR CHARGED LEPTONS

PÉREZ MARTÍNEZ, Ricardo

RESUMEN

El uso de los grupos en la física de partículas es relevante en el problema del sabor, el cual trata de explicar la jerarquía de masas para los fermiones en el sector de Yukawa del Modelo Estándar. En este trabajo mostramos una aplicación del grupo no Abeliano S_3 en la construcción del lagrangiano de Yukawa y la matriz de masa. En particular exploramos la influencia de una representación de dimensión dos de S_3 y los coeficientes de Clebsch-Gordan en la estructura de la matriz de masa para leptones cargados. Consideramos un modelo reportado en la literatura donde otra representación de S_3 es usada. Encontramos que nuestra matriz de masa presenta una estructura diferente y un menor número de parámetros que la correspondiente matriz del modelo original. Enfatizamos que el origen de la estructura de nuestra matriz de masa es debido a los coeficientes de Clebsch-Gordan ya que estos dependen de la base para la representación de S_3.

Palabras clave: grupos; representaciones; coeficientes de Clebsch-Gordan; matriz de masa; física de partículas.

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Universidad Autónoma de Coahuila. Saltillo, Coahuila, México.

ABSTRACT

The use of groups in particle physics is relevant to the flavor problem, which seeks to explain the mass hierarchy for fermions in the Yukawa sector of the Standard Model. In this work, we show an application of the non-Abelian group S_3 in the construction of the Yukawa lagrangian and the mass matrix. In particular, we explore the influence of a two-dimensional representation of S_3 and the Clebsch-Gordan coefficients in the structure of the mass matrix for charged leptons. We consider a model reported in the literature where a different representation of S_3 is used. We find that our mass matrix has a different structure and fewer parameters than the corresponding matrix of the

Correspondencia
ricardo.perezmartinez@uadec.edu.mx
https://orcid.org/0000-0003-2923-4970
Fecha de recepción
5 de febrero de 2026.
Fecha de aceptación
12 de agosto de 2026.

Este artículo fue sometido a revisión por pares doble ciego

original model. We emphasize that the origin of the structure of our mass matrix is due to the Clebsch-Gordan coefficients since these depend on the basis for the representation of S_3.

Keywords: *groups; representations; Clebsch-Gordan coefficients; mass matrix; particle physics.*

1. INTRODUCCIÓN

La descripción de las partículas elementales y sus interacciones está dada por el Modelo Estándar (ME) de la física de partículas (Langacker, 2020; Peskin & Schroeder, 1995). Este modelo es exitoso porque ha sido probado experimentalmente con gran precisión. Sin embargo, existen algunos aspectos en el ME que hacen pensar que este modelo no sea considerado como la teoría final (Langacker, 2020). Un ejemplo de esto se presenta en el sector de Yukawa, el cual está descrito por un lagrangiano que describe las interacciones entre los fermiones con el campo de Higgs. Este sector tiene muchos parámetros libres que deben ser ajustados para que sus predicciones estén de acuerdo con las observaciones experimentales (Langacker, 2020; Zupan, 2019). La intensidad de estas interacciones está dada por los acoplamientos de Yukawa. Al aplicar el mecanismo de Higgs se obtiene una matriz de masa para los fermiones, la cual depende, por ejemplo, de los acoplamientos de Yukawa como parámetros libres en el ME.

Las observaciones indican que las masas de los fermiones presentan una jerarquía en sus valores. Por ejemplo, la masa del tau es mucho mayor que la masa del electrón, aproximadamente por un orden de 3.5×10^3 (Navas et al., 2024). En el ME es necesario ajustar los valores de los acoplamientos de Yukawa para reproducir los valores de las masas de los fermiones. Sin embargo, uno se pregunta el porqué los acoplamientos de Yukawa deben tener tales valores, o en forma equivalente, el porque los fermiones tienen los valores de masa reportados por los experimentos. Estas cuestiones forman parte del problema del sabor de la física de partículas, donde la palabra sabor se refiere a los distintos tipos o sabores de fermiones en el ME (Grossman, 2010; Zupan, 2019). Una propuesta para tratar de entender y explicar este problema es considerar grupos discretos no Abelianos referidos como grupos de sabor. Estos grupos pueden provenir de la geometría de los orbifolds usados en la compactificación de la cuerda heterótica (Baur et al., 2019;

Nilles et al., 2020; Nilles & Ramos-Sánchez, 2024) y también pueden ser propuestos directamente en modelos más allá del ME (Ding & King, 2024; Ding & Valle, 2025; Feruglio, 2018; Ishimori et al., 2010). En particular, el grupo de permutaciones S_3 y el grupo cíclico Z_2 han sido considerados en diversos estudios del problema del sabor (Canales et al., 2012; Meloni, 2012; Mondragón et al., 2007). En estos modelos las propiedades matemáticas del grupo restringen la estructura del lagrangiano de Yukawa y la matriz de masa. Un posible efecto de los grupos de sabor en estas construcciones es que la matriz de masa podría depender de un número menor de parámetros comparado al caso del ME y que sus predicciones, a través de un estudio fenomenológico, estuvieran de acuerdo con las observaciones experimentales. De esta forma, la estructura de la matriz de masa y los valores de las masas de los fermiones podrían tener una explicación basada en las simetrías del grupo de sabor (Ishimori et al., 2010; Nilles & Ramos-Sánchez, 2024).

En estas construcciones los coeficientes de Clebsch-Gordan (CCG) del producto directo de representaciones del grupo no Abeliano de sabor son indispensables para construir el lagrangiano de Yukawa que es invariante ante la simetría de tal grupo. Una propiedad de los CCG es que dependen de la base, y en consecuencia, de la representación del grupo. Imaginemos un modelo donde una representación del grupo de sabor es usada para construir el lagrangiano de Yukawa y la matriz de masa de un tipo de fermiones. Entonces, una pregunta interesante sería: ¿qué cambios en la estructura y el número de parámetros de la matriz de masa se obtendrían si otra representación del grupo S_3 fuera usada?

El objetivo de este trabajo es explorar el efecto del cambio de base o de representación del grupo no Abeliano S_3 en la estructura de la matriz de masa para leptones cargados como una aplicación del grupo de permutaciones S_3 en la física de partículas. En particular elegimos una representación de dimensión dos para el grupo S_3 y usamos los CCG del producto de dos y tres dobletes de S_3 para construir el lagrangiano de Yukawa invariante y la matriz de masa para leptones cargados. Tomamos como base el modelo reportado en Kubo et al. (2003) donde otra representación de S_3 es usada. Comparamos nuestra matriz de masa con la correspondiente matriz del modelo original y notamos que nuestra matriz de masa presenta una estructura diferente y un menor número de parámetros. Discutimos las razones de tales modificaciones enfatizando que su origen es debido a los

CCG, pues estos dependen de la base elegida para la representación del grupo S_3. Mostramos también la matriz de cambio de base entre estas dos representaciones de S_3. En este trabajo no exploramos las implicaciones fenomenológicas de nuestra matriz de masa para leptones cargados ya que está más allá del objetivo del presente trabajo.

El contenido de este artículo es el siguiente. En la sección 2 mostramos algunas propiedades de S_3 como las representaciones y los CCG que son necesarios para la construcción de la matriz de masa. En la sección 3 hablamos sobre el problema del sabor en el ME y el uso de los grupos en este contexto. En la sección 4 presentamos la aplicación del grupo S_3 en la construcción de la matriz de masa para leptones cargados tomando como base el modelo reportado en (Kubo et al., 2003). En la sección 5 presentamos una discusión de resultados basada en las razones que dan lugar a la estructura de nuestra matriz de masa cuando se compara con la matriz reportada en el modelo original. Finalmente, en la sección 6 las conclusiones son presentadas.

2. S_3, REPRESENTACIONES Y COEFICIENTES DE CLEBSCH-GORDAN

El grupo S_3 es el grupo de permutaciones de tres objetos. Es un grupo discreto no Abeliano con seis elementos. La presentación de S_3 según Ramond (2010)

$$S_3 = < a, b \mid a^3 = b^2 = (ab)^2 = e >, \quad (1)$$

donde a y b son los generadores del grupo y e es el elemento identidad. Los elementos de S_3 son $\{e, a, a^2, b, ab, ba\}$ y sus tres clases de conjugación son

$$C_1 = \{e\}, \ C_2 = \{a, a^2\}, \ C_3 = \{b, ab, ba\}. \quad (2)$$

La tabla de carácter para S_3 se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Tabla de carácter de S_3. El primer renglón y la primera columna enumeran las clases y representaciones irreducibles de S_3, respectivamente.

	1	2	3
1	1	1	1
2	1	-1	1
3	2	0	-1

La segunda columna en la tabla 1 corresponde a la clase $C_1 = \{e\}$ por lo que la traza de la representación $R(e)$ es la dimensión de la representación. De esta forma, en S_3 se tienen dos representaciones de dimensión uno, y una de dimensión dos. En términos de las representaciones $R(g)$ las clases de conjugación son

$$C_1 = \{R(e)\},\ C_2 = \{R(a), R(a^2)\}, C_3 = \{R(b), R(ab), R(ba)\}. \qquad (3)$$

Una representación matricial de dimensión dos para los generadores a y b de S_3 está dada por Ishimori et al. (2010)

$$R(a) = {}^1\!/_2 \begin{pmatrix} -1 & -\sqrt{3} \\ \sqrt{3} & -1 \end{pmatrix}, \qquad R(b) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}. \qquad (4)$$

Las representaciones para los demás elementos del grupo se pueden obtener mediante $R(a^2) = R(a) * R(a), R(ab) = R(a) * R(b), R(ba) = R(b) * R(a)$, y para el elemento identidad se tiene que $R(e) = \mathbb{1}$, la matriz identidad de dimensión dos.

De la tabla de caracter se puede conocer cómo el producto directo de dos representaciones irreducibles se escribe como sumas directas de representaciones irreducibles (Tung, 1985). Por ejemplo, en S_3 se tiene que $\mathbf{2} \otimes \mathbf{2} = \mathbf{1} \oplus \mathbf{1} \oplus \mathbf{2}$. En este contexto, si $R(g)$ es una representación matricial de dimensión dos, entonces $R(g) \otimes R(g) = U(g)$ denota una representación reducible de dimensión cuatro. La matriz $U(g)$ se puede llevar a una base donde se representa como una matriz diagonal por bloques $U_d(g) = D_1 \oplus D_2 \oplus D_3$, tal que la suma de las dimensiones de $D_{1,2,3}$ es cuatro. Lo anterior establece que existe una matriz de transformación (de cambio de base) T tal que $TUT^{-1} = U_d$. Los coeficientes de Clebsch-Gordan (CCG) son los elementos de T. Para la representación (4) de S_3 se tiene que la matriz T está dada por

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}. \qquad (5)$$

Los CCG en (5) establecen cómo se transforman las componentes de dos dobletes de S_3 en el producto $\mathbf{2} \otimes \mathbf{2} = \mathbf{1} \oplus \mathbf{1} \oplus \mathbf{2}$. En este caso, la regla de multiplicación está dada por Ishimori et al. (2010):

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = (x_1 y_1 + x_2 y_2) \oplus (x_1 y_2 - x_2 y_1) \oplus \begin{pmatrix} x_1 y_1 - x_2 y_2 \\ x_1 y_2 + x_2 y_1 \end{pmatrix}. \qquad (6)$$

Para las aplicaciones que nos interesan en la física de partículas basta enfocarnos a la combinación lineal que se transforma de manera invariante. En este caso, esta combinación es $(x_1 y_1 + x_2 y_2)$, y corresponde a la primera representación de dimensión uno que aparece en la suma directa. La segunda combinación lineal, $(x_1 y_2 - x_2 y_1)$, asociada a la segunda representación de dimensión uno, no es invariante porque adquiere un signo menos bajo la transformación $\mathbf{2} \otimes \mathbf{2}$ en S_3. Para tomar en cuenta esta distinción se suele escribir $\mathbf{2} \otimes \mathbf{2} = \mathbf{1} \oplus \mathbf{1}' \oplus \mathbf{2}$.

Utilizaremos la notación

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} \rightarrow (x_1 y_1 + x_2 y_2) \qquad (7)$$

para indicar solamente la combinación lineal invariante que surge del producto $\mathbf{2} \otimes \mathbf{2}$ en S_3. Del producto $\mathbf{2} \otimes \mathbf{2} \otimes \mathbf{2}$ se obtiene otra combinación lineal invariante, la cual está dada por

$$\binom{x_1}{x_2} \otimes \binom{y_1}{y_2} \otimes \binom{z_1}{z_2} \rightarrow (x_1y_2z_1 + x_2y_2z_1 + x_1y_1z_2 - x_2y_2z_2). \qquad (8)$$

Es conocido que los CCG dependen de la base elegida para la representación del grupo S_3, mientras que la relación $\mathbf{2} \otimes \mathbf{2} = \mathbf{1} \oplus \mathbf{1} \oplus \mathbf{2}$ es independiente de la base (Tung, 1985). Consideremos ahora la siguiente representación, dada por Ishimori et al. (2010) de dimensión dos para S_3

$$R(a) = \begin{pmatrix} \omega & 0 \\ 0 & \omega^2 \end{pmatrix}, \qquad R(b) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \qquad (9)$$

donde $\omega = e^{2\pi i/3}$. En este caso el producto tensorial de dos dobletes de S_3 está dado por Ishimori et al. (2010)

$$\binom{x_1}{x_2} \otimes \binom{y_1}{y_2} = (x_1y_2 + x_2y_1) \oplus (x_1y_2 - x_2y_1) \oplus \binom{x_2y_2}{x_1y_1}. \qquad (10)$$

La matriz de transformación T está dada por

$$T = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \qquad (11)$$

La primera combinación lineal en (10) corresponde a la combinación lineal invariante, lo cual indicamos mediante

$$\binom{x_1}{x_2} \otimes \binom{y_1}{y_2} \rightarrow (x_1y_2 + x_2y_1). \qquad (12)$$

Del producto $\mathbf{2} \otimes \mathbf{2} \otimes \mathbf{2}$ se obtiene otro invariante dado por

$$\binom{x_1}{x_2} \otimes \binom{y_1}{y_2} \otimes \binom{z_1}{z_2} \rightarrow (x_2y_2z_2 + x_1y_1z_1). \qquad (13)$$

Notamos que los CCG para el producto $\mathbf{2} \otimes \mathbf{2} = \mathbf{1} \oplus \mathbf{1} \oplus \mathbf{2}$ mostrados en (6), son distintos a los mostrados en (10). Esto es porque en (6) usamos la representación (4) de S_3, mientras que en (10) usamos la representación (9).

Estas dos representaciones matriciales de dimensión dos se ven distintas, pero son equivalentes ya que están relacionadas por un cambio de base mediante la transformación de similaridad $P^{-1}RP = R'$, donde

$$P = \alpha \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -i & i \end{pmatrix} \tag{14}$$

es la matriz de transformación o de cambio de base, con $\alpha = 1/\sqrt{2}$, y donde R y R' denotan las representaciones (4) y (9) de S_3, respectivamente. De esta forma, apreciamos que los CCG son dependientes de la base o de la representación, mientras que la regla $\mathbf{2} \otimes \mathbf{2} = \mathbf{1} \oplus \mathbf{1} \oplus \mathbf{2}$ es independiente de ella. Otras estructuras de los grupos que no dependen de la representación del grupo son las clases de conjugación y la tabla de caracter, es decir, de la traza de la representación (Tung, 1985).

3. Problema del sabor en el Modelo Estándar

El lagrangiano que describe las interacciones entre los fermiones y el campo de Higgs en el ME es el lagrangiano de Yukawa, el cual es invariante bajo el grupo de norma $G_{ME} = SU(3)_c \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$ (Peskin & Schroeder, 1995). Para el sector de leptones este lagrangiano está dado por Langacker (2020)

$$L_Y = -Y_{mn}\bar{l}_{mL}\phi e_{nR} + h.c., \tag{15}$$

donde los subíndices repetidos m y n indican sumatoria con valores $m, n = 1,2,3$ para las tres familias de leptones del ME. Los acoplamientos de Yukawa son denotados por Y_{mn} e indican la intensidad de la interacción. La abreviación $h.c.$ se refiere al hermitiano conjugado del primer término. Las representaciones de los campos en (15) bajo el grupo del ME se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Representaciones para los leptones y el Higgs bajo el grupo $\boldsymbol{G_{ME}} = \boldsymbol{SU(3)_c \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y}$.

Leptones	Representaciones	Higgs	Representación
$l_{mL} = \begin{pmatrix} \nu_{mL} \\ e_{mL} \end{pmatrix}$	$3(\mathbf{1},\mathbf{2})_{-1/2}$	$\phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix}$	$1(\mathbf{1},\mathbf{2})_{1/2}$
ν_{mR}	$3(\mathbf{1},\mathbf{1})_0$		
e_{mR}	$3(\mathbf{1},\mathbf{1})_{-1}$		

La notación usada es $\boldsymbol{m(R_3,R_2)_y}$, donde $\boldsymbol{m} = \mathbf{1},\mathbf{2},\mathbf{3}$ denota la familia de fermiones. $\boldsymbol{R_3}$ es la representación bajo $\boldsymbol{SU(3)_c}$, $\boldsymbol{R_2}$ es la representación bajo $\boldsymbol{SU(2)_L}$, y $\boldsymbol{y}$ es el valor de hipercarga $\boldsymbol{Y}$, la cual está relacionada con la carga eléctrica de estas partículas.

Los campos l_{mL} son dobletes de $SU(2)_L$, y contienen a los neutrinos y leptones cargados izquierdos. Los campos ν_{mR} y e_{mR} denotan a los neutrinos y leptones cargados derechos, los cuales son singuletes de $SU(2)_L$. El subíndice L y R indica la quiralidad izquierda y derecha, respectivamente (Peskin & Schroeder, 1995). El campo de Higgs es denotado por ϕ, y es un doblete de $SU(2)_L$.

Al aplicar el mecanismo de Higgs (o rompimiento espontáneo de la simetría) se obtiene la matriz de masa para leptones cargados (Langacker, 2020; Peskin & Schroeder, 1995),

$$M_{ME} = \frac{v}{\sqrt{2}} \qquad (16)$$

donde $v = 246$ GeV es la escala electrodébil. La matriz en (16) es no hermitiana en general, y su diagonalización es efectuada por la transformación

$$A_L^{\dagger} M_{ME} A_R = \text{diag}(m_e, m_\mu, m_\tau), \qquad (17)$$

donde A_L y A_R son matrices unitarias, y m_f, para $f = e,\mu,\tau$, denota las masas de los leptones cargados: electrón (e), muón (μ) y tau (τ). Al reescribir el lagrangiano de Yukawa en términos de los campos físicos se obtienen las expresiones para las masas de los leptones cargados (Langacker, 2020; Tong, s. f.),

$$m_e = y_e \frac{v}{\sqrt{2}}, \quad m_\mu = y_\mu \frac{v}{\sqrt{2}}, \quad m_\tau = y_\tau \frac{v}{\sqrt{2}}, \qquad (18)$$

donde y_f son los acoplamientos Yukawa. De acuerdo a las mediciones experimentales los valores aproximados para estas masas y acoplamientos se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Valores aproximados para las masas y acoplamientos de Yukawa de los leptones cargados del ME (Navas et al., 2024).

Leptón cargado	Generación	Masa	Acoplamiento de Yukawa
electrón	primera	$m_e \approx 0.5$ MeV	$y_e \approx 2.9 \times 10^{-6}$
muón	segunda	$m_\mu \approx 105.6$ MeV	$y_\mu \approx 6.1 \times 10^{-4}$
tau	tercera	$m_\tau \approx 1776.9$ MeV	$y_\tau \approx 1 \times 10^{-2}$

De la tabla 3 notamos que existe una jerarquía entre las masas de estas partículas, por ejemplo, la masa del electrón es mucho menor que la masa del tau, y análogamente para los acoplamientos de Yukawa. Una de las preguntas que el problema del sabor trata de responder es: ¿cuál es el origen del patrón observado para las masas de los leptones cargados?

En las expresiones para las masas de los leptones cargados, presentadas en (18), se tiene que los acoplamientos de Yukawa son parámetros libres, por lo que tienen que ser ajustados a mano para reproducir los valores de masa observados. Sería deseable contar con una teoría que tuviera un mecanismo que diera directamente los valores correctos a tales parámetros, proporcionando así un origen al patrón de masas observado en la naturaleza.

El problema del sabor en la física de partículas no solo trata de explicar el patrón de jerarquía en las masas de los leptones cargados, sino también el patrón de masas presentado en los neutrinos y en los quarks. Otras cuestiones que trata el problema del sabor son, por ejemplo: ¿Por qué se tienen tres generaciones de fermiones? ¿Por qué las matrices de mezcla para los leptones y los quarks son distintas? (Grossman, 2010; Nilles y Ramos-Sánchez, 2024; Zupan, 2019). La búsqueda de las respuestas a estas preguntas fundamentales en la física de partículas ha llevado a considerar propuestas interesantes como el uso de grupos matemáticos que a continuación tratamos.

3.1 GRUPOS DE SABOR

Una propuesta para tratar de resolver el problema del sabor es usar grupos discretos no Abelianos como S_3, S_4, A_4, D_4, $\Delta(54)$, entre otros (Barman et al., 2024; Chamoun & Lashin, 2025; Das y Pal, 2018; Ding & Valle, 2025; Escobar & Luhn, 2009; Hernández et al., 2022; Ishimori et al., 2008, 2010; Meloni, 2012; Mondragón et al., 2007). A los grupos aplicados en este contexto se les suele llamar grupos de sabor. Los modelos construidos con este tipo de grupos son ejemplos de modelos más allá del ME, donde no solo

se considera una extensión al grupo del ME por el grupo de sabor G, sino también campos adicionales a los del ME. En estos modelos extendidos los campos son asignados a representaciones del grupo de sabor tal que mediante el uso de sus propiedades algebraicas se tenga un control sobre los acoplamientos en el lagrangiano de Yukawa, el cual debe ser invariante bajo el grupo de sabor G. De esta manera, las simetrías del grupo restringen la forma del lagrangiano de Yukawa del modelo. Después del rompimiento espontáneo de simetría, el grupo de sabor también influye en la estructura de la matriz de masa donde se busca, en parte, que esta tenga un número menor de parámetros y que su estructura sea algo más simple, como contar con la presencia de algunos elementos nulos, comparada con la matriz de masa en el ME (Félix et al., 2007; Ishimori et al., 2010; Nilles & Ramos-Sánchez, 2024). De esta manera, después del proceso de diagonalización y construcción de la matriz de mezcla, se espera que las masas de los fermiones dependan de un número menor de parámetros.

Otro tipo de grupos de sabor son los grupos modulares (Arriaga-Osante et al., 2025; Ding & King, 2024; Ding & Valle, 2025). Las propiedades matemáticas de estos grupos implican que los acoplamientos de Yukawa son formas modulares, las cuales son funciones matemáticas que dependen de un parámetro complejo y que se transforman de una manera específica bajo el grupo modular. En estos modelos el número de parámetros en el sector de Yukawa es menor al caso de modelos con grupos que no son modulares (Feruglio, 2018). A los grupos no modulares se les suele llamar grupos tradicionales (Nilles & Ramos-Sánchez, 2024). Tanto los grupos tradicionales como modulares y su unión no trivial (grupos eclécticos) pueden originarse en la geometría de los orbifolds usados en la compactificación de la cuerda heterótica (Baur et al., 2019; Carballo-Pérez et al., 2016; Nilles et al., 2020).

Para los propósitos de este trabajo nos enfocamos al grupo S_3 como grupo tradicional de sabor, y cuyo origen es debido a las permutaciones de tres objetos. No consideramos su origen por la geometría de los orbifolds, ni tampoco un tratamiento como grupo modular. Estos aspectos podrían ser tratados en un trabajo futuro. En la siguiente sección mostramos cómo las propiedades matemáticas del grupo S_3 restringen la forma del lagrangiano de Yukawa y la matriz de masa en un modelo particular donde nos enfocamos a un tipo específico de fermiones.

4. S_3 EN LA CONSTRUCCIÓN DE LA MATRIZ DE MASA

En esta sección consideramos el grupo de sabor S_3 con la representación de dimensión dos presentada en (9), y con los coeficientes de Clebsch-Gordan en (12) y (13) asociados a los invariantes que resultan del producto de dos y tres dobletes de S_3, respectivamente. El objetivo es construir la matriz de masa para leptones cargados tomando como base el modelo original presentado por Kubo et al. (2003), donde se usó la representación (4) de S_3 y una simetría Z_2. Nos interesa conocer si la matriz de masa para leptones cargados que calculamos con la representación (9) de S_3 presenta un número menor de parámetros que la correspondiente matriz del modelo original.

En la tabla 4 presentamos el contenido de partículas de nuestro interés en el modelo de Kubo et al. (2003), además de sus asignaciones a las representaciones 1 y 2 del grupo S_3. En este modelo se consideran dos dobletes de Higgs adicionales al del ME para tener términos de interacción renormalizables en el lagrangiano de Yukawa.

Tabla 4. Contenido de partículas (leptones y Higgses) para el modelo de nuestro interés. La asignación de estos campos a las representaciones irreducibles de S_3 se muestra en la tercera columna. El subíndice I toma valores $I = 1,2$.

Leptones cargados	Higgses	Representación de S_3
l_{IL}, e_{IR}	ϕ_I	**2**
l_{3L}, e_{3R}	ϕ	**1**

En el ME la estructura del lagrangiano de Yukawa L_Y para leptones está dada en (15). Ahora deseamos construir el lagrangiano análogo para el modelo con contenido de partículas mostrado en la tabla 4 y que sea invariante bajo el grupo S_3 con la representación (9). Para obtener tal lagrangiano se consideran todos los posibles acoplamientos de Yukawa que sean renormalizables para estos campos y que den lugar a combinaciones lineales invariantes de sus componentes bajo S_3. Tales invariantes están dictaminados por los CCG en (12) y (13), los cuales surgen de los productos tensoriales **2** $\otimes$

$\mathbf{2}$ y $\mathbf{2} \otimes \mathbf{2} \otimes \mathbf{2}$ en S_3, respectivamente. Los acoplamientos a considerar son entonces los que se presentan en la tabla 5.

Tabla 5. Productos de representaciones en S_3 que dan lugar a acoplamientos de Yukawa renormalizables e invariantes bajo $G_{SM} \otimes S_3$. El caso e) es el producto invariante trivial. Los acoplamientos de Yukawa son denotados por $y_i, i = 1,2, \ldots ,5$.

Caso	Producto de representaciones	Acoplamientos de Yukawa
a)	$\mathbf{2} \otimes \mathbf{2} \otimes \mathbf{2}$	$y_1(\bar{l}_{IL}\phi_I e_{IR})$
b)	$\mathbf{2} \otimes \mathbf{2} \otimes \mathbf{1}$	$y_2(\bar{l}_{IL}\phi_I e_{3R})$
c)	$\mathbf{2} \otimes \mathbf{1} \otimes \mathbf{2}$	$y_3(\bar{l}_{IL}\phi e_{IR})$
d)	$\mathbf{1} \otimes \mathbf{2} \otimes \mathbf{2}$	$y_4(\bar{l}_{3L}\phi_I e_{IR})$
e)	$\mathbf{1} \otimes \mathbf{1} \otimes \mathbf{1}$	$y_5(\bar{l}_{3L}\phi e_{3R})$

La asignación de e_{IR} a la representación $\mathbf{2}$ de S_3 que se muestra en la tabla 4 indica que este doblete de S_3 tiene como componentes a e_{1R} y e_{2R}, entonces

$$e_{IR} = \begin{pmatrix} e_{1R} \\ e_{2R} \end{pmatrix}, \tag{19}$$

mientras que e_{3R}, al ser asignado a la representación 1 de S_3, es un singulete de este grupo. Los campos $e_{iR}, i = 1,2,3$, son a la vez singuletes de $SU(2)_L$ del ME.

Otro ejemplo es el doblete de S_3 formado por los campos de Higgs $\phi_I, I = 1,2$, entonces

$$\phi_I = \begin{pmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{pmatrix}, \tag{20}$$

donde ϕ_1 y ϕ_2 son, cada uno, dobletes de $SU(2)_L$ en el grupo del ME. Para los demás campos la asignación a estas dos representaciones de S_3 es análoga. Para ilustrar el uso de los CCG en estas construcciones consideramos, por ejemplo, el término d) $\mathbf{1} \otimes \mathbf{2} \otimes \mathbf{2}$: $y_4(\bar{l}_{3L}\phi_I e_{IR})$ de la tabla 5. Usando los CCG en (12) se tiene que el acoplamiento invariante bajo S_3 está dado por

$$y_4\left(\bar{l}_{3L} \otimes \begin{pmatrix}\phi_1\\ \phi_2\end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix}e_{1R}\\ e_{2R}\end{pmatrix}\right) \to y_4\left(\bar{l}_{3L}(\phi_1 e_{2R} + \phi_2 e_{1R})\right) = y_4(\bar{l}_{3L}\phi_1 e_{2R} + \bar{l}_{3L}\phi_2 e_{1R}). \quad (21)$$

Como otro ejemplo consideremos el primer término en la tabla 5, es decir, a) $\mathbf{2} \otimes \mathbf{2} \otimes \mathbf{2}$: $y_1(\bar{l}_{IL}\phi_I e_{IR})$. Usando los CCG en (13) se tiene que el término invariante bajo S_3 es

$$y_1\left(\begin{pmatrix}\bar{l}_{1L}\\ \bar{l}_{2L}\end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix}\phi_1\\ \phi_2\end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix}e_{1R}\\ e_{2R}\end{pmatrix}\right) \to y_1(\bar{l}_{1L}\phi_1 e_{1R} + \bar{l}_{2L}\phi_2 e_{2R}). \quad (22)$$

Aplicando los CCG (12) y (13) a los demás acoplamientos no triviales de la tabla 5 obtenemos el lagrangiano de Yukawa invariante bajo $G_{ME} \otimes S_3$

$$L_Y = -y_1(\bar{l}_{2L}\phi_2 e_{2R} + \bar{l}_{1L}\phi_1 e_{1R}) - y_2(\bar{l}_{1L}\phi_2 e_{3R} + \bar{l}_{2L}\phi_1 e_{3R}) - y_3(\bar{l}_{1L}\phi e_{2R} + \bar{l}_{2L}\phi e_{1R}) \quad (23)$$

$$-y_4(\bar{l}_{3L}\phi_1 e_{2R} + \bar{l}_{3L}\phi_2 e_{1R}) - y_5(\bar{l}_{3L}\phi e_{3R}) + h.c.$$

Consideramos ahora el mecanismo de Higgs. En este modelo se tiene que los valores de expectación en el vacío (VEV) para los campos de Higgs están dados por Kubo et al. (2003)

$$\phi = \begin{pmatrix}\phi^+\\ \phi^0\end{pmatrix} \to \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}0\\ v\end{pmatrix}, \quad \phi_i = \begin{pmatrix}\phi_i^+\\ \phi_i^0\end{pmatrix} \to \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}0\\ v_i\end{pmatrix}, i = 1,2, \quad (24)$$

donde $v^2 + v_1^2 + v_2^2 = (246\ \text{GeV})^2$. Substituyendo (24) en (23) obtenemos

$$L_Y = -y_1(\bar{e}_{2L}v_2 e_{2R} + \bar{e}_{1L}v_1 e_{1R}) - y_2(\bar{e}_{1L}v_2 e_{3R} + \bar{e}_{2L}v_1 e_{3R}) - y_3(\bar{e}_{1L}v e_{2R} + \bar{e}_{2L}v e_{1R}) \quad (25)$$

$$-y_4(\bar{e}_{3L}v_1e_{2R} + \bar{e}_{3L}v_2e_{1R}) - y_5(\bar{e}_{3L}ve_{3R}) + h.c.$$

donde hemos puesto el factor común $\frac{1}{\sqrt{2}}$ a 1 por simplicidad. El lagrangiano en (25) puede ser reescrito como

$$L_Y = (\bar{e}_{1L}, \bar{e}_{2L}, \bar{e}_{3L}) \begin{pmatrix} y_1v_1 & y_3v & y_2v_2 \\ y_3v & y_1v_2 & y_2v_1 \\ y_4v_2 & y_4v_1 & y_5v \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_{1R} \\ e_{2R} \\ e_{3R} \end{pmatrix} + h.c. \quad (26)$$

Asumiendo ahora que $v_1 = v_2$ se tiene que la matriz de masa para leptones cargados es

$$M_A = \begin{pmatrix} y_1v_1 & y_3v & y_2v_1 \\ y_3v & y_1v_1 & y_2v_1 \\ y_4v_1 & y_4v_1 & y_5v \end{pmatrix}. \quad (27)$$

Para reducir el número de parámetros en (27) se considera una simetría discreta Z_2. A los campos $l_{IL}, e_{IR}, \phi_I, l_{3L}$ y e_{3R} se les asigna la carga $+1$ bajo Z_2, mientras que a ϕ se le asigna la carga -1 (Félix et al., 2007; Kubo et al., 2003). Los acoplamientos permitidos son aquellos que son compatibles (invariantes) con la simetría Z_2. Por ejemplo, el acoplamiento en a) $y_1(\bar{l}_{IL}\phi_I e_{IR})$ de la tabla 5 tiene carga $(+1)$ bajo Z_2 ya que $(+1)(+1)(+1) = +1$, por lo que este término es invariante bajo Z_2. Por otra parte, el acoplamiento c) $y_3(\bar{l}_{IL}\phi e_{IR})$ de la tabla 5 no es invariante bajo Z_2 pues tiene carga $(+1)(-1)(+1) = -1$. Aplicando este procedimiento a los demás acoplamientos de la tabla 5 se tiene que los términos asociados a y_3 y y_5 no son compatibles con Z_2, por lo que son removidos del lagrangiano de Yukawa y de la matriz de masa. Esto es equivalente a tomar $y_3 = y_5 = 0$ en (27), por lo que la matriz de masa para leptones cargados es

$$M_A = v_1 \begin{pmatrix} y_1 & 0 & y_2 \\ 0 & y_1 & y_2 \\ y_4 & y_4 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_1 & 0 & m_2 \\ 0 & m_1 & m_2 \\ m_4 & m_4 & 0 \end{pmatrix}. \quad (28)$$

Esta matriz tiene 12 parámetros reales provenientes de los acoplamientos de Yukawa y_i, los cuales son complejos en esta parte, y donde hemos tomado en cuenta el número de veces que se repiten. El valor de v_1 está determinado por la escala electrodébil.

Por otra parte, las matrices análogas a (27) y (28) reportadas por Kubo et al. (2003) son

$$M_B = \begin{pmatrix} y_1 v_1 + y_3 v & y_1 v_1 & y_2 v_1 \\ y_1 v_1 & -y_1 v_1 + y_3 v & y_2 v_1 \\ y_4 v_1 & y_4 v_1 & y_5 v \end{pmatrix}, \tag{29}$$

y

$$M_B = v_1 \begin{pmatrix} y_1 & y_1 & y_2 \\ y_1 & -y_1 & y_2 \\ y_4 & y_4 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_1 & m_1 & m_2 \\ m_1 & -m_1 & m_2 \\ m_4 & m_4 & 0 \end{pmatrix}, \tag{30}$$

respectivamente, donde la representación (4) de S_3 fue usada. La matriz en (30) presenta 16 parámetros reales.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el esquema de la figura 1 presentamos las matrices de masa para leptones cargados M_{ME} en (16), M_A en (28) y M_B en (30) para notar el cambio en su estructura causado por el uso de los grupos S_3 y Z_2. Recordemos que en la construcción M_A y M_B se usaron dos representaciones distintas de dimensión dos para S_3. Notamos que el número de parámetros reales en las matrices de masa M_A, M_B y M_{ME} son 12, 16 y 18, respectivamente, además de presentar tres, uno y cero elementos de matriz nulos.

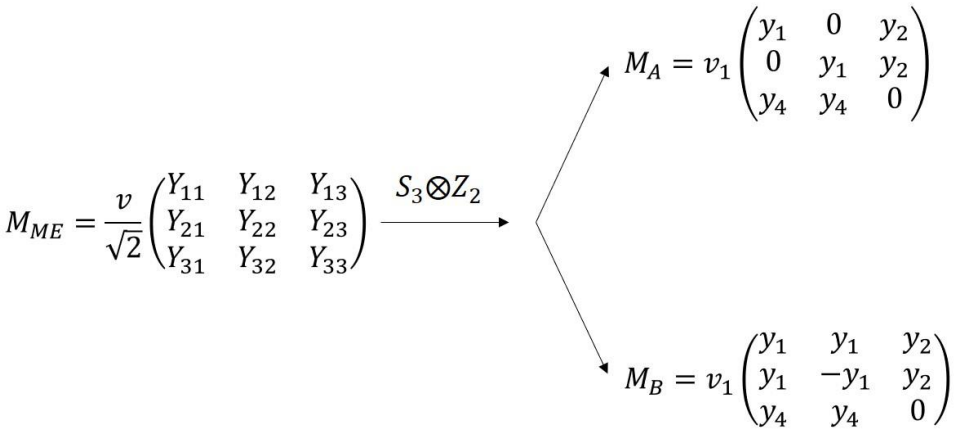


Figura 1. Esquema que muestra las matrices de masa para los leptones cargados en tres contextos diferentes. La matriz de masa a la izquierda corresponde al caso del ME y fue

presentada en (16). Las matrices en la parte derecha corresponden al caso donde se usaron los grupos S_3 y Z_2. La matriz M_A (M_B) en la parte superior (inferior) derecha es la matriz (28) ((30)), y está asociada a la representación (9) ((4)) de S_3. Notamos que el cambio de representación para S_3 modifica su estructura y el número de parámetros reales, como se nota al comparar M_A con M_B.

Los cambios en la estructura de las matrices de masa M_A y M_B son debidos a los CCG ya que estos son dependientes de la base o de la representación de S_3. Por ejemplo, los CCG para los términos invariantes bajo S_3 que resultan de los productos $\mathbf{2} \otimes \mathbf{2}$ y $\mathbf{2} \otimes \mathbf{2} \otimes \mathbf{2}$ con la representación (9) de S_3 están dados en (12) y (13), y fueron usados en la construcción de M_A. Por otra parte, para M_B se emplearon los CCG en (7) y (8), asociados a la representación (4) de S_3.

Los respectivos CCG provocaron que los elementos de matriz con y_3 aparecieran en distintas posiciones en las matrices M_A y M_B. Mientras que en M_A se tienen dos términos con y_3 fuera de la diagonal, en M_B aparecen sumándose a términos con y_1 en la diagonal, como se nota en (27) y (29). El elemento de matriz con y_5 permanece en la misma posición en ambas matrices. Como la simetría Z_2 implica $y_3 = y_5 = 0$, resulta que M_A da lugar a tres elementos nulos mientras que M_B solamente a uno, como se aprecia en (28) y (30). Otro efecto de los CCG es que la matriz M_A presenta dos elementos menos con y_1 que la matriz M_B.

Aunque las representaciones (4) y (9) de S_3 se ven distintas se tiene que son equivalentes ya que están relacionadas por una transformación de similaridad $P^{-1}RP = R'$, donde P es la matriz de cambio de base mostrada en (14), y R (R') denota la representación (4) ((9)) de S_3. Por lo tanto, un cambio base o de representación de dimensión dos para S_3 sí influye en la estructura y en la reducción del número de parámetros en la matriz de masa para leptones cargados.

5.1 Nota sobre estudios fenomenológicos

Para estudiar la fenomenología de los leptones en este tipo de modelos es necesario construir la matriz de mezcla para leptones o matriz PMNS (Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata). Su construcción requiere información del sector de neutrinos, los cuales son leptones sin carga eléctrica (Langacker, 2020; Peskin & Schroeder, 1995). En este trabajo no hemos considerado tal sector porque nuestro objetivo es explorar la influencia del cambio de base o

de representación del grupo S_3 en la estructura de la matriz de masa para leptones cargados, como una aplicación del grupo no Abeliano S_3 en estas construcciones. Sin embargo, una breve discusión sobre la construcción de la matriz de mezcla y su uso en exploraciones fenomenológicas para leptones se presenta enseguida (Félix et al., 2007; Kubo et al., 2003; Langacker, 2020).

La matriz de mezcla para leptones está definida por

$$U = A_{eL}^{\dagger} A_{\nu L}, \tag{31}$$

donde A_{eL} y $A_{\nu L}$ son las matrices unitarias usadas en la diagonalización de las matrices de masa para leptones cargados y para neutrinos, respectivamente. La diagonalización de la matriz de masa M para leptones cargados es efectuada por dos transformaciones unitarias A_{eL} y A_{eR} de la siguiente manera

$$A_{eL}^{\dagger} M A_{eR} = M_d = \text{diag}(m_e, m_\mu, m_\tau). \tag{32}$$

Para encontrar A_{eL} se construye la matriz hermitiana $N = MM^{\dagger}$. Usando (32) se tiene que

$$N = A_{eL} N_d A_{eL}^{\dagger}, \tag{33}$$

donde $N_d = \text{diag}(m_e^2, m_\mu^2, m_\tau^2)$. En este desarrollo es necesario expresar a $N = MM^{\dagger}$ en términos de las masas de los leptones cargados, lo cual requiere otro proceso algebraico. De esta forma A_{eL} se construye básicamente de los eigenvectores de N. Un proceso análogo se efectúa para obtener $A_{\nu L}$ en el sector de neutrinos, el cual presenta detalles adicionales debido a la naturaleza de estas partículas (Langacker, 2020). Para estudios fenomenológicos, como la oscilación de neutrinos, se compara la matriz de mezcla teórica (31) con la matriz de mezcla reportada en PDG (Navas et al., 2024), la cual está parametrizada por tres ángulos de mezcla y una fase de violación CP (conjugación de carga y paridad), asumiendo que los neutrinos son campos de Dirac.

CONCLUSIONES

En este trabajo exploramos la influencia de la representación (9) de dimensión dos del grupo S_3 en la estructura de la matriz de masa para leptones cargados como una aplicación de los grupos discretos no Abelianos en la física de partículas. Para este propósito nos enfocamos al sector de leptones cargados usando como base el modelo presentado por Kubo et al. (2003), donde la representación (4) de S_3 fue usada.

La matriz de masa para leptones cargados que obtuvimos se presenta en (28) y la llamamos M_A. La correspondiente matriz reportada por Kubo et al. (2003) se presenta en (30) y la denotamos por M_B. Encontramos que la representación (9) de S_3 modifica la estructura de la matriz de masa y reduce el número de parámetros reales. Un aspecto crucial de los CCG con la representación (9) es que estos modifican las posiciones y la manera en que los dos elementos de matriz con acoplamiento y_3 aparecen en M_A, dando lugar no solo a un menor número de parámetros, sino también a favorecer la presencia de dos elementos nulos en M_A después de aplicar la simetría Z_2. Respecto al número de parámetros obtuvimos que nuestra matriz de masa M_A presenta 12 parámetros reales mientras que M_B tiene 16. El origen de estas diferencias en estructura es debido a los CCG ya que estos dependen de la base, y justamente las representaciones (4) y (9) de S_3 están relacionadas por una transformación de similaridad, donde la matriz de cambio de base está dada en (14).

Por lo tanto, en el modelo considerado en este trabajo se tiene que la representación (9) de S_3 y los correspondientes CCG tienen el efecto de modificar la estructura y reducir el número de parámetros de la matriz de masa para leptones cargados, en comparación con la correspondiente matriz que se obtiene al usar la representación (4) de S_3.

PLANES FUTUROS

Un estudio fenomenológico de leptones sería necesario para conocer las implicaciones físicas de nuestra matriz de masa. Para esto sería necesario construir la matriz de mezcla (31), lo cual requiere incluir el sector de neutrinos en el análisis. Tales estudios fenomenológicos podrían formar parte de un trabajo futuro.

REFERENCIAS

Arriaga-Osante, C., Chen, M., Díaz-Castro, R., Li, X., Liu, X., Ramos-Sánchez, S., & Ratz, M. (2025). Multiple realizations of modular flavor symmetries and their phenomenology. *Journal of High Energy Physics,* 2025(6): 96. https://doi.org/10.1007/jhep06(2025)096

Baur, A., Nilles, H. P., Trautner, A., & Vaudrevange, P. K. (2019). Unification of flavor, CP, and modular symmetries. *Physics Letters B,* 795: 7–14. https://doi.org/10.1016/j.physletb.2019.03.066

Barman, A., Francis, N. K., & Bora, H. (2024). Neutrino mixing phenomenology: A4 discrete flavor symmetry with type-I seesaw mechanism. *Modern Physics Letters A,* 39(07): 2350200. https://doi.org/10.1142/s0217732323502000

Canales, F. G., Mondragón, A., & Mondragón, M. (2012). The S3 flavour symmetry: Neutrino masses and mixings. *Fortschritte Der Physik*, 61(4-5): 546-570. https://doi.org/10.1002/prop.201200121

Carballo-Pérez, B., Peinado, E., & Ramos-Sánchez, S. (2016). Δ(54) flavor phenomenology and strings. *Journal of High Energy Physics*, 2016(12): 131. https://doi.org/10.1007/jhep12(2016)131

Chamoun, N., & Lashin, E. I. (2025). Textures of neutrino mass matrix from S4 flavor symmetry. *Journal of High Energy Physics,* 2025(1): 16. https://doi.org/10.1007/jhep01(2025)016

Das, D., & Pal, P. B. (2018). S3 flavored left-right symmetric model of quarks. *Physical Review. D.*, *98*(11): 115001. https://doi.org/10.1103/physrevd.98.115001

Ding, G., & King, S. F. (2024). Neutrino mass and mixing with modular symmetry. *Reports On Progress In Physics*, 87(8): 084201. https://doi.org/10.1088/1361-6633/ad52a3

Ding, G., & Valle, J. W. (2025). The symmetry approach to quark and lepton masses and mixing. *Physics Reports*, 1109: 1–105. https://doi.org/10.1016/j.physrep.2024.12.005

Escobar, J. A., & Luhn, C. (2009). The flavor group Δ(6n2). *Journal of Mathematical Physics*, 50(1): 013524. https://doi.org/10.1063/1.3046563

Félix, O., Mondragón, A., Mondragón, M., & Peinado, E. (2007). Neutrino masses and mixings in a minimal S3 invariant extension of the standard model. *AIP Conference Proceedings*, 917(1): 383-389. https://doi.org/10.1063/1.2751980

Feruglio, F. (2018). Are neutrino masses modular forms? *WORLD SCIENTIFIC EBooks*, 227–266. https://doi.org/10.1142/9789813238053_0012

Georgi, H. (1999). *Lie algebras in particle physics*. CRC Press.

Grossman, Y. (2010). Introduction to flavor physics. *arXiv (Cornell University)*, 73–106. https://doi.org/10.5170/cern-2010-002.111

Hernández, A. E. C., Long, H. N., Mora-Urrutia, M. L., Thao, N. H., & Vien, V. V. (2022). Fermion masses and mixings and g-2 muon anomaly in a 3-3-1 model with D4 family symmetry. *The European Physical Journal C,* 82(8): 769. https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-022-10639-9

Ishimori, H., Kobayashi, T., Ohki, H., Omura, Y., Takahashi, R., & Tanimoto, M. (2008). D4 flavor symmetry for neutrino masses and mixing. *Physics Letters B,* 662(2): 178–184. https://doi.org/10.1016/j.physletb.2008.03.007

Ishimori, H., Kobayashi, T., Ohki, H., Shimizu, Y., Okada, H., & Tanimoto, M. (2010). Non-Abelian Discrete Symmetries in Particle Physics. *Progress Of Theoretical Physics Supplement*, 183: 1-163. https://doi.org/10.1143/ptps.183.1

Kubo, J., Mondragón, A., Mondragón, M., & Rodríguez-Jáuregui, E. (2003). The flavor symmetry. *Progress Of Theoretical Physics*, 109(5): 795-807. https://doi.org/10.1143/ptp.109.795

Langacker, P. (2020). *The standard model & beyond* (2nd ed.). CRC Press.

Mondragón, A., Mondragón, M., & Peinado, E. (2007). Lepton masses, mixings, and flavor-changing neutral currents in a minimal S3 invariant extension of the standard model. *Physical Review. D.*, 76(7): 076003. https://doi.org/10.1103/physrevd.76.076003

Meloni, D. (2012). S3 as a flavour symmetry for quarks and leptons after the Daya Bay result on θ 13. *Journal of High Energy Physics*, 2012(5): 124. https://doi.org/10.1007/jhep05(2012)124

Navas, S., Amsler, C., Gutsche, T., Hanhart, C., Hernández-Rey, J. J., Lourenço, C., Masoni, A., Mikhasenko, M., Mitchell, R. E., Patrignani, C., Schwanda, C., Spanier, S., Venanzoni, G., Yuan, C. Z., Agashe, K., Aielli, G., Allanach, B. C., Alvarez-Muñiz, J., Antonelli, M., . . . Zheng, W. (2024). Review of Particle Physics. *Physical Review. D.*, 110(3): 030001. https://doi.org/10.1103/physrevd.110.030001

Nilles, H. P., y Ramos-Sánchez, S. (2024). The flavor puzzle: Textures and symmetries. *International Journal Of Modern Physics A*, 39(09n10): 2441003. https://doi.org/10.1142/s0217751x24410033

Nilles, H. P., Ramos-Sánchez, S., & Vaudrevange, P. K. S. (2020). Eclectic flavor groups. *Journal of High Energy Physics*, 2020(2): 45. https://doi.org/10.1007/jhep02(2020)045

Peskin, M. E., & Schroeder, D. V. (1995). *An Introduction to Quantum Field Theory*. Westview Press.

Pérez-Martínez, R. (2024). S3 y S4: representaciones y coeficientes de Clebsch-Gordan. *Abstraction and Application*, 46: 73-86. https://intranet.matematicas.uady.mx/journal/

Ramond, P. (2010). *Group theory: A Physicist's Survey*. Cambridge University Press.

Tong, D. (s. f.). Lectures on the Standard Model. https://www.damtp.cam.ac.uk/user/tong/standardmodel.html

Tung, W.-K. (1985). *Group theory in physics*. World Scientific Company.

Zupan, J. (2019). Introduction to flavour physics. *CERN Yellow Reports: School Proceedings*, 6: 181-212. https://doi.org/10.23730/cyrsp-2019-006.181

EFECTO DEL PWHT EN LA ACTUALIDAD: UNA REVISIÓN

REVISIÓN

CURRENT EFFECTS OF PWHT: A REVIEW

ZAPATA GARZA, Irving Gael[1]

CRUZ HERNÁNDEZ, Ventura Lilia [2]

SALAS TORRES, Luis Horacio [2]

FALCÓN FRANCO, Lázaro Abdiel [1]

1. Facultad de Metalurgia, Universidad Autónoma de Coahuila. Monclova, Coahuila, México.

2. Facultad de Contaduría y Administración, Universidad Autónoma de Coahuila. Monclova, Coahuila, México.

RESUMEN

El tratamiento térmico post-soldadura (PWHT) es fundamental para garantizar la integridad de uniones metálicas mediante el alivio de esfuerzos residuales y la estabilización microestructural. Esta revisión sintetiza investigaciones del periodo 2020–2025, analizando los mecanismos de relajación elasto-plástica y el rol de la plasticidad inducida por transformación (TRIP) como amortiguador de tensiones internas. Se examina la respuesta de materiales avanzados, incluyendo aceros de alta resistencia y aceros inoxidables, destacando la necesidad de optimizar las rampas térmicas para evitar la degradación de propiedades mecánicas. Asimismo, se exploran tecnologías avanzadas como la simulación computacional y los tratamientos térmicos localizados, proporcionando una perspectiva crítica sobre la evolución del PWHT hacia procesos más eficientes.

Palabras clave: *tratamiento térmico; soldadura; propiedades.*

ABSTRACT

Post-weld heat treatment (PWHT) is essential for ensuring the integrity of metallic joints through residual stress relief and microstructural stabilization. This review synthesizes research from the 2020–2025 period, analyzing elasto-plastic relaxation mechanisms and the role of transformation-induced plasticity (TRIP) as an internal stress buffer. The response of advanced materials is examined, including high-strength steels and stainless steels, highlighting the necessity of optimizing thermal ramps to prevent the degradation of mechanical properties. Furthermore, advanced technologies such as computational simulation and localized heat treatments are explored, providing a critical perspective on the evolution of PWHT toward more efficient processes.

Keywords: *heat treatment; welding; properties.*

Correspondencia
cruz.lilia@uadec.edu.mx
https://orcid.org/0009-0003-3753-7944

Fecha de recepción
1 de diciembre de 2025.
Fecha de aceptación
14 de junio de 2026.

Este artículo fue sometido a revisión por pares doble ciego

1. INTRODUCCIÓN

La soldadura por arco eléctrico (figura 1) es un proceso de unión de metales, que emplea el calor generado por el arco eléctrico para fundir el metal base, y en muchos casos, un metal de aporte (Falodun et al., 2025). Estos procesos de soldadura a menudo se encuentran protegidos por gases como el argón, evitando así contaminarse con gases atmosféricos como el nitrógeno (Chakravarthula et al., 2024).

Imaginemos el tanque de gas LP que se usa para cocinar o calentar el agua en el boiler. Si no hay un manómetro, no se tiene certeza de que el gas se encuentre dentro del tanque, ya que no se puede ver ni se puede abrir el tanque para ver si está ahí. Sin embargo, uno confía en que hay gas porque la estufa enciende y el agua se calienta, como sugiere la figura 2. No se ve el gas, pero se sabe que existe por los efectos que produce. De esa forma sucede con los electrones, que son tan pequeños y se mueven a tanta velocidad que no se pueden observar directamente. Sin embargo, su comportamiento es lo que define todo lo que se conoce: desde cómo se genera la electricidad hasta cómo reaccionan las moléculas en los seres vivos.

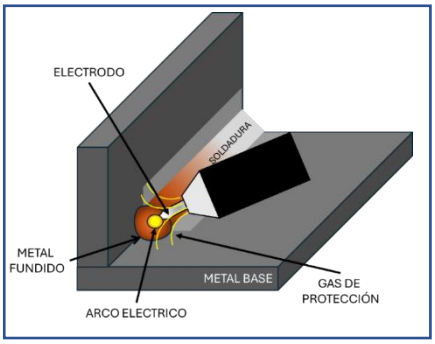


Figura 1. Representación de un método de soldadura por arco metálico con gas (GMAW por sus siglas en inglés).
Adaptado de Falodun et al (2025); Zhang et al. (2024).

Sin embargo, los procesos de soldadura, aunque esenciales para unir componentes metálicos, introducen ciclos térmicos complejos que dan lugar a microestructuras en desequilibrio, esfuerzos residuales y una posible degradación de las propiedades mecánicas (Tomerlin et al., 2023). La zona afectada por el calor (ZAC) en la figura 2 y el metal de soldadura suelen presentar fases endurecidas, especialmente en los aceros, lo que puede comprometer la tenacidad de fractura y la resistencia mecánica tanto a cargas estáticas como cíclicas (fatiga). Además, el calentamiento y enfriamiento no uniformes inherentes a la soldadura generan esfuerzos residuales de tracción que pueden acercarse a los niveles de límite elástico, lo que puede provocar fallas prematuras bajo cargas de servicio.

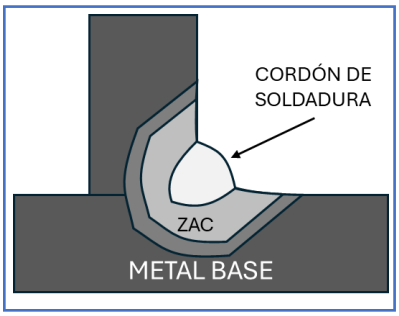


Figura 2. Junta soldada con representación de la ZAC y del metal base.

Adaptado de Chakravarthula et al. (2024).

El tratamiento térmico post-soldadura (PWHT, por sus siglas en inglés) ha evolucionado como la principal herramienta metalúrgica para hacer frente a estos retos, mediante la aplicación de ciclos térmicos controlados posteriores a la finalización de la soldadura. El PWHT puede templar las fases duras, aliviar los esfuerzos residuales, restaurar la ductilidad, la tenacidad y, en algunos casos, precipitar de nuevo las fases de endurecimiento en aleaciones endurecibles por envejecimiento (Alipooramirabad et al., 2022). La eficacia del PWHT depende de numerosos factores, entre los que se incluyen la composición química del material, el proceso de soldadura, la geometría de los componentes, el método de calentamiento, el ciclo de temperatura-tiempo y la velocidad de enfriamiento.

Los recientes avances en la tecnología de soldadura, los materiales avanzados de alta resistencia como el acero S960QL (para el cual el PWHT convencional ya no se presenta como la opción más óptima o segura) y los requisitos de eficiencia energética han impulsado una importante investigación para optimizar los procesos de PWHT.

Esta revisión bibliográfica recopila información de efectos en la microestructura y propiedades mecánicas, alivio de tensiones y control de la distorsión, parámetros específicos para la realización de un correcto PWHT en aceros, tecnologías de tratamiento térmico localizado y herramientas computacionales avanzadas aplicadas al PWHT.

2. METODOLOGÍA

Se realizó una búsqueda de artículos relacionados con el PWHT, incluyendo textos que abordaran mecanismos fundamentales, técnicas y tecnologías avanzadas. Los recursos utilizados para la búsqueda y recolección de artículos

fueron ResearchGate y Elsevier, empleando las siguientes palabras clave para la selección de artículos.

- PWHT Residual stress simulation
- Localized PWHT
- TRIP in welding
- Properties
- CREEP
- Numerical modeling

La selección de artículos priorizó su contemporaneidad. Sin embargo, no se descartaron publicaciones antiguas, para brindar una perspectiva de cómo el *PWHT* se ha ido optimizando a lo largo de la última década.

3. DESARROLLO Y DISCUSIÓN

3.1 EFECTOS EN LA MICROESTRUCTURA Y PROPIEDADES MECÁNICAS

3.1.1 Evolución microestructural

Aceros de alta resistencia. Las investigaciones sobre el acero de alta resistencia S690QL1 demuestran que el PWHT reduce progresivamente el contenido de martensita en favor de las estructuras templadas. El aumento de la temperatura del PWHT de 550 °C a 650 °C da lugar a una reducción sistemática de la dureza en el metal base, el metal de soldadura y la ZAC (Ferro et al., 2020). R. Sisodia et al. (2024) obtuvieron una mejora en pruebas de tenacidad al impacto para el acero S960QL confirmando que el PWHT promueve la recuperación y el revenido de la martensita. La evolución microestructural sigue la cinética clásica del templado, con precipitación de carburos y descomposición de la martensita.

Aceros de doble fase. Los estudios sobre los aceros DP780 y DP1400 muestran que el PWHT de revenido y el PWHT asistido por láser, respectivamente, transforman la fase martensítica acicular dura en martensita revenida (refinada y uniforme), que es menos frágil, lo que reduce la diferencia de dureza entre las fases ferrita y martensita (Chakravarthula et al., 2024; R. P.

S. Sisodia & Gáspár, 2021). Esta homogeneización microestructural mejora la conformabilidad, pero podría reducir la resistencia a la tracción.

Aceros inoxidables. El PWHT de las soldaduras del acero inoxidable 304 afecta a la precipitación de carburos y a la naturaleza de los límites de grano. Un PWHT adecuado puede disolver los carburos detrimentales y mantener la resistencia a la corrosión (Kellai et al., 2022).

3.1.2 Comportamiento mecánico ocasionado por el PWHT

Resistencia y dureza. El PWHT suele reducir el límite elástico y la resistencia a la tracción máxima en aceros de alta resistencia debido al templado de la martensita. El acero S690QL1 mostró una reducción de la resistencia del 15–25 % al aumentar la temperatura del PWHT, aunque esto vino acompañado de una mejora en la ductilidad (Ferro et al., 2020). La compensación entre resistencia y tenacidad requiere una optimización cuidadosa basada en los requisitos de servicio.

Resistencia y ductilidad. El PWHT generalmente mejora la resistencia y la ductilidad, al funcionar como un proceso de revenido, el PWHT transforma las microestructuras duras y frágiles formadas durante el enfriamiento de la soldadura (como la martensita o la bainita superior) en fases más blandas y dúctiles (Chakravarthula et al., 2024; Xiong et al., 2024). Sin embargo, la respuesta depende de la temperatura y puede ser perjudicial si se produce un templado excesivo. Las pruebas de impacto Charpy de varios grados de acero muestran rangos de temperatura óptimos para el PWHT en los que se maximiza la resistencia y se mantiene una resistencia adecuada (Falodun et al., 2025; Goo, 2021).

Resistencia a la fatiga. El efecto del PWHT sobre el comportamiento frente a la fatiga es complejo y depende de múltiples factores, entre ellos el estado de los esfuerzos residuales, la homogeneidad microestructural y el estado de la superficie. Sin embargo, algunos estudios informan de resultados de fatiga mixtos, especialmente en componentes a escala real, donde los efectos geométricos pueden afectar las mejoras del material (Kromm et al., 2020a).

El PWHT induce cambios microestructurales significativos (tamaño de grano, precipitados y cambios de fase) que además de influir directamente en las propiedades mecánicas, también afectan a los esfuerzos residuales. Estando estrechamente ligadas el cambio de una con la otra, estos efectos específicos

dependen de la PWHT, del material base, del proceso de soldadura y de los parámetros del PWHT.

3.2 ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES Y CONTROL DE LA DISTORSIÓN

Durante el soldeo, el material queda en un estado de restricción interna debido a que la contracción térmica está impedida por las zonas más frías o por la propia rigidez de la junta, acumulando esfuerzos que a menudo alcanzan el límite elástico del material a temperatura ambiente (Falodun et al., 2025).

- Cuando la unión soldada tiene baja restricción (libertad de deformación), la contracción natural del metal al enfriarse se traduce principalmente en deformaciones visibles (distorsión angular o longitudinal) (Seong et al., 2023).

- Cuando la unión soldada tiene alta restricción (debido a su geometría, rigidez o sujeciones), el material circundante impide la contracción libre. Esta restricción obliga a que las fuerzas térmicas se manifiesten como altas cantidades de esfuerzos residuales internos que son invisibles, pero pueden alcanzar el límite elástico del material (Seong et al., 2023).

Al depender de la disminución y el incremento de la restricción de la deformación, se genera una relación inversamente proporcional entre la contracción y los esfuerzos residuales (relación visible en la Figura 3). Los esfuerzos residuales derivados de la soldadura también afectan significativamente a la vida útil, la susceptibilidad a la corrosión bajo tensión y la estabilidad dimensional (Falodun et al., 2025).

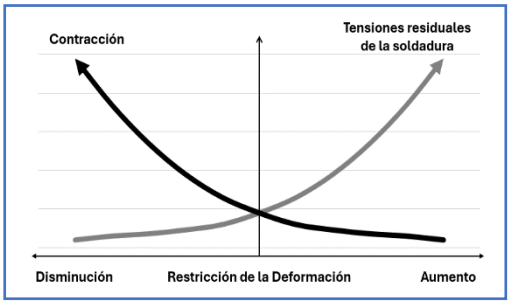


Figura 3. Relación de factores respecto a la disminución y el aumento de la restricción de la deformación durante la soldadura, adaptado de Syahroni e Hidayat (2012).

El PWHT alivia los esfuerzos residuales a través de varios mecanismos:

- Relajación de la tensión térmica a temperaturas elevadas, donde se reduce la resistencia al límite elástico.
- Deformación por fluencia que permite la redistribución de la tensión con el tiempo.
- Transformaciones de fase que pueden acomodar la deformación a través de cambios de volumen (Falodun et al., 2025; Yang, 2021).

3.2.1 Mecanismo de relajación: transición elasto-plástica y CREEP.

En el momento en que el límite elástico termo-dependiente es menor que el esfuerzo residual de tracción, el material ya no puede sostener esa carga elásticamente. La restricción se rompe mediante una deformación plástica local instantánea. Los esfuerzos que superan este nuevo umbral se relajan conforme el material fluye plásticamente, redistribuyendo las cargas internas uniformemente (Syahroni & Hidayat, 2012).

Una vez que el esfuerzo decrece hasta igualar el límite elástico a alta temperatura, el alivio continúa a través de la fluencia lenta o CREEP. Bajo las condiciones de mantenimiento del PWHT, los átomos tienen suficiente movilidad para reordenarse mediante el ascenso y deslizamiento de dislocaciones. El modelo de Norton-Bailey, citado por Yu et al. (2022), describe matemáticamente cómo esta deformación por fluencia convierte la energía elástica remanente en deformación plástica permanente a lo largo del tiempo, eliminando así la restricción interna de forma progresiva.

En aceros de alta resistencia, el PWHT no solo reduce el límite elástico para permitir la relajación, sino que también suaviza las estructuras martensíticas frágiles creadas por el arco eléctrico, transformándolas en martensita revenida (R. P. S. Sisodia & Gáspár, 2021). Esto asegura que, una vez enfriada la pieza y recuperado el límite elástico original, la restricción interna haya desaparecido sin riesgo de que aparezcan grietas por relevo de esfuerzos, siempre que se controlen fenómenos tales como la precipitación de carburos en aceros aleados (Kromm et al., 2020b).

3.2.2 Interacción entre transformación de fase y esfuerzos (efecto TRIP)

La TRIP se define como la deformación plástica anómala que ocurre cuando una transformación de fase (como la de austenita a martensita o bainita) se produce en presencia de un esfuerzo mecánico, incluso si ese esfuerzo es inferior al límite elástico del material. En la soldadura, los esfuerzos residuales

actúan como esa carga externa, provocando que el material "fluya" plásticamente durante la transformación, lo que ayuda a acomodar las deformaciones térmicas y reduce los picos de tensión local (Yang, 2021).

Cuando la austenita se transforma en fases como la martensita, ocurre una expansión volumétrica. Esta expansión genera deformaciones de compresión que pueden contrarrestar las tensiones de tracción provocadas por la contracción térmica durante el enfriamiento (Liu et al., 2021; Yang, 2021). La TRIP permite que esta expansión se traduzca en una redistribución más efectiva de los esfuerzos, evitando concentraciones críticas que podrían derivar en agrietamiento.

Se señala que la TRIP actúa como un amortiguador metalúrgico:

- Relajación de tensiones de tracción. Al permitir una deformación plástica a niveles de carga bajos durante el cambio de fase, se reduce la magnitud de los esfuerzos residuales de tracción en la zona de fusión y la zona afectada por el calor (ZAC).
- Alteración del perfil tensional: puede incluso invertir el estado de tensión en la superficie del cordón, pasando de tracción (peligrosa para la fatiga) a compresión, dependiendo de la temperatura de inicio de la transformación martensítica y la cinemática del proceso (Yang, 2021).

3.3 CONSIDERACIONES ESPECÍFICAS

Los aceros al carbono tradicionales responden bien al PWHT convencional, con un recocido de 600–650 °C que proporciona una reducción eficaz de los esfuerzos residuales sin una pérdida significativa de resistencia. La respuesta al templado es predecible en función del contenido de carbono y los elementos de aleación. Los aceros de alta resistencia y baja aleación requieren una selección más cuidadosa de los parámetros del PWHT, debido a sus microestructuras complejas y mecanismos de endurecimiento. El templado excesivo puede eliminar el endurecimiento por precipitación, mientras que un tratamiento insuficiente puede no proporcionar un alivio adecuado de la tensión.

Las investigaciones sobre el acero S960QL demuestran que las uniones soldadas por haz de electrones requieren temperaturas de PWHT de 580–620 °C para lograr un equilibrio óptimo entre el alivio de esfuerzos y la retención

de resistencia (R. Sisodia et al., 2024). Las temperaturas más altas provocan un ablandamiento excesivo del metal base.

Los aceros inoxidables austeníticos presentan retos únicos para el PWHT debido a su baja conductividad térmica y su alto coeficiente de expansión térmica. El PWHT debe evitar el rango de temperatura de sensibilización (450–850 °C) donde precipitan carburos de cromo, por lo que el material debe someterse a un enfriamiento rápido inmediatamente después del PWHT para evitar una nueva exposición a este intervalo de temperaturas. En el acero inoxidable 304 se demostró que el PWHT a 1050 °C, seguido de un enfriamiento rápido, disolvía eficazmente los carburos de cromo, incrementaba la resistencia a la corrosión y mejoraba las propiedades mecánicas (Kellai et al., 2022).

Los aceros para servicio a alta temperatura, como el 13CrMoV, son susceptibles de sufrir grietas por alivio de esfuerzos durante el PWHT. Las investigaciones indican que estas grietas son el resultado de la combinación de esfuerzos residuales de soldadura, fragilización del material y esfuerzos térmicos durante el calentamiento (Kromm et al., 2020a, 2020b).

Las estrategias de prevención incluyen:

- Velocidades de calentamiento controladas para minimizar los gradientes térmicos.
- Alivio de esfuerzos antes del PWHT mediante métodos mecánicos, como el granallado, la laminación, el ultrasonido, la carga mecánica, el esmerilado y el chorro de arena, entre otros.
- Ciclos de PWHT modificados con mantenimientos de temperatura intermedios (Falodun et al., 2025; Goo, 2021; Yang, 2021; Zhang et al., 2024).

La figura 4 muestra los intervalos de temperatura del PWHT para distintos aceros. Las rampas no incluyen los tiempos de tratamiento debido a las diferencias entre materiales, como el espesor y la composición. Por ello, se requiere un diseño que optimice las propiedades en cada situación.

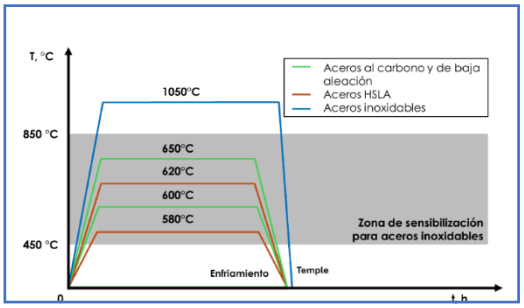


Figura 4. Temperaturas y tiempos de PWHT para aceros.
Adaptado de Rodríguez Soca et al. (2012)

3.4 MÉTODOS Y EQUIPOS DE TRATAMIENTO TÉRMICO LOCALIZADO

El calentamiento tradicional en horno sigue siendo el método de PWHT más común, ya que proporciona una distribución uniforme de la temperatura, pero requiere una cantidad significativa de energía y tiempo. Investigaciones recientes, como las de Falodun et al. (2025), Li et al. (2019), R. Sisodia et al. (2024) y Zhang et al. (2024), han explorado métodos de calentamiento alternativos:

- Tratamiento térmico localizado con haz de electrones post-soldadura (EBL-PWHT por sus siglas en inglés). Generalmente realizado al vacío, el calentamiento con haz de electrones enfocado (figura 5) permite el tratamiento específico de zonas de soldadura concretas, al tiempo que minimiza el calentamiento global, lo que reduce el consumo de energía (entre un 70 % y un 80 %) y permite obtener menos del 20 % de la distorsión registrada con el PWHT convencional (Alipooramirabad et al., 2022; R. P. S. Sisodia et al., 2024). Chen et al. (2002) obtuvieron, mediante el EBL-PWHT, la transformación de martensita acicular gruesa en martensita de listones en la zona fundida y en bainita inferior en la ZAC. En el ensayo de desplazamiento de la punta de grieta, se obtuvo un valor de 0.468 mm en la zona de soldadura, frente a los 0.074 mm obtenidos sin el tratamiento, lo que indica una mejora de la tenacidad a la fractura.

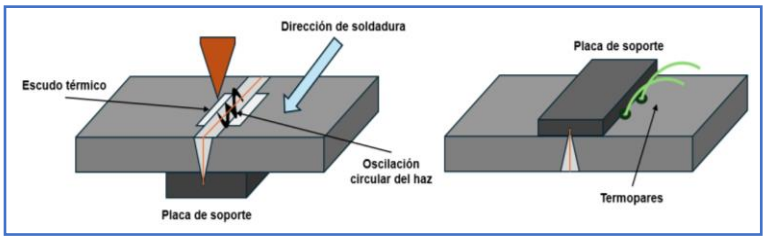


Figura 5. Esquema del proceso de EBL-PWHT.

- La figura 6 muestra un PWHT con sistema láser de alta potencia (LBW-PWHT, por sus siglas en inglés). El PWHT con sistema láser de alta potencia utiliza un haz de luz coherente (fotones) y puede realizarse sin vacío (en atmósfera controlada), lo que permite un calentamiento rápido y localizado con un excelente control del proceso (Falodun et al., 2025; Xiong et al., 2024). Los recientes avances en los sistemas de modelado y escaneo del haz permiten patrones de calentamiento complejos adaptados a geometrías de unión específicas (Zhang et al., 2024). R. P. S. Sisodia y Gáspár (2021) obtuvieron martensita revenida al aplicar el LBW-PWHT para reducir los picos de dureza en las subzonas de grano fino y grueso para aceros duales.

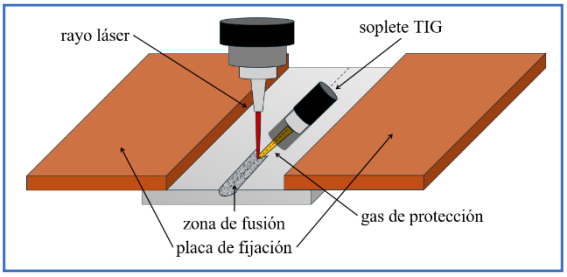


Figura 6. Esquema del proceso de LBW-PWHT.
Adaptado de Xiong et al. (2024).

- Tratamiento térmico post-soldadura por inducción (PWHT, por sus siglas en inglés): la inducción electromagnética (figura 7) proporciona un calentamiento rápido y controlado adecuado para geometrías específicas y puede automatizarse para entornos de producción (Gutiérrez Corani & Quispe Coca, 2024). Boudreault et al. (2014) encontraron que, para el acero CA6NM, la microdureza (HV), la tenacidad al impacto, la microestructura y las propiedades se mantuvieron equivalentes tanto con el PWHT tradicional como con el PWIHT.

Para uniones de placas de acero inoxidable revestidas (Q235/304) Cao et al. (2025) obtuvieron que tras 90 min de PWIHT la difusión de cromo en la matriz austenítica es drástica, lo que elimina el déficit y la segregación de cromo en las interfases y aumenta la resistencia a la corrosión localizada δ - $^{F}/_{A}$,. En contraste, Li et al. (2019) evaluaron el impacto tanto del precalentamiento como del PWHT en el acero S690QL y obtuvieron una mejor respuesta con el precalentamiento inductivo, evitando la exposición al segundo pico de

temperatura del post-calentamiento, que causa crecimiento heterogéneo del grano y aparición de porosidades. La tabla 1 compara los diferentes métodos expuestos en este trabajo.

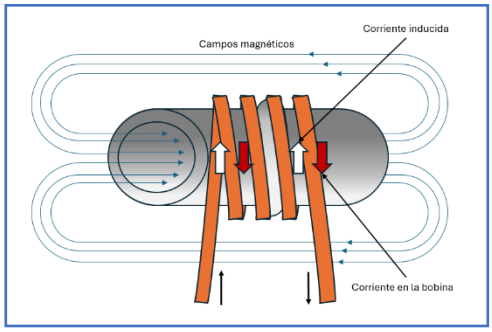


Figura 7. Esquema del PWHT.
Adaptado de
Gutiérrez Corani y Quispe Coca (2024).

Tabla 2. Comparación de los diferentes métodos de PWHT.
Adaptado de R. P. S. Sisodia y Gáspár (2021), Chen et al. (2002), Cao et al. (2025) y Falodun et al. (2025)

Método	Eficiencia energética	Reducción de distorsión	Entorno requerido	Aplicación principal
Horno	Baja (alta inercia)	Variable (global)	Atmosférico, vacío	Componentes pequeños, medianos
EBL-PWHT	Muy alta (70–80 % ahorro)	Reducción superior al 80 %	Vacío (limitante)	Soldaduras críticas de alta precisión
LBW-PWHT	Alta	Alta (localizada)	Atmosférico controlado	Geometrías complejas, aceros duales
PWHT	Media alta	Localizada	Atmosférico (portátil)	Reparación en campo, tuberías y turbina

3.5 Modelado y simulación de procesos

La implementación de herramientas computacionales, como en la mayoría de los sectores, ha supuesto una evolución significativa en la capacidad de predecir la integridad estructural. La simulación no solo reduce los costos experimentales, sino que también permite al usuario comprender mejor los fenómenos a escalas de tiempo y temperatura que serían difíciles de medir físicamente.

3.5.1 Modelos térmico-mecánicos acoplados

La simulación moderna de soldadura toma como base el análisis termomecánico, en el que el historial de temperaturas generado por la fuente

de calor móvil dicta la respuesta elastoplástica del material. Syahroni e Hidayat (2012) demuestran que el uso de un análisis desacoplado secuencial permite predecir con un alto grado de precisión cómo la entrada de calor influye en la distorsión de juntas complejas. Sin embargo, la simulación se extiende más allá del arco eléctrico hacia el tratamiento térmico. Yu et al. (2022) introducen la importancia de acoplar modelos de fluencia lenta (CREEP), como el de Norton-Bailey, para simular la relajación de tensiones durante el mantenimiento térmico. La tabla 2 expone los valores más relevantes acerca de la implementación del CREEP frente a la simulación sin CREEP.

Estos modelos permiten observar cómo la energía elástica acumulada se transforma en deformación plástica permanente, lo que contribuye al alivio de los esfuerzos residuales de la unión.

Tabla 3. Comparación de los modelos estudiados por Yu et al. (2022)

Parámetro	Sin CREEP	Con CREEP
Modelo	Elastoplástico	Viscoplástico
Dependencia del tiempo	No	Sí
Relajación de esfuerzos	Baja	Alta
Esfuerzo residual final	Alto	Bajo
Precisión respecto del experimento	Baja	Alta
Mecanismo dominante	Plasticidad	Fluencia (CREEP)

3.5.2 Modelado de la transformación de fase

Un avance crítico para los modelos de simulación fue la inclusión de la cinética de reacción (Yang, 2021). Modelos sofisticados, como el de Johnson-Mehl-Avrami, incorporan la cinética de la transformación y permiten predecir la evolución microestructural durante el PWHT.

Yang (2021) subraya que el TRIP debe integrarse en el código de cálculo, ya que el cambio de volumen durante la transición de austenita a martensita o bainita altera drásticamente el estado tensional local. Además, programas

informáticos especializados, como SYSWELD (figura 9), permiten a los investigadores predecir la fracción de fases en tiempo real durante el enfriamiento (Liu et al., 2021). Esta capacidad es fundamental para optimizar los ciclos de PWHT y asegurar que el tiempo y la temperatura sean suficientes para transformar estructuras frágiles en microestructuras más dúctiles y tenaces, sin necesidad de ensayos destructivos de prueba y error.

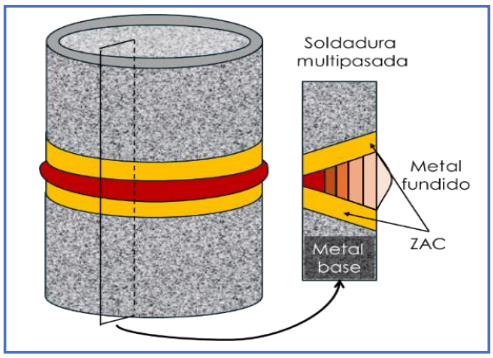


Figura 9. Representación de soldadura multipasada realizada por SYSWELD para la obtención del objeto de estudio. Adaptado de Liu et al. (2021).

3.5.3 Predicción de esfuerzos residuales

Uno de los principales objetivos de los modelos y simuladores de PWHT es predecir los esfuerzos residuales de tracción. Seong et al. (2023) validan que los modelos de esfuerzo inherente son herramientas lo suficientemente eficaces para simplificar cálculos en placas gruesas, proporcionando una distribución de tensiones a través del espesor que coincide con mediciones realizadas con difracción de neutrones. Sin embargo, la predicción no es estática, sino que depende de las variables del proceso. Syahroni e Hidayat (2012) ilustran cómo la simulación de diferentes secuencias de soldeo (figura 10) revela que el orden en que se depositan los cordones puede redistribuir los esfuerzos residuales de manera favorable o desfavorable.

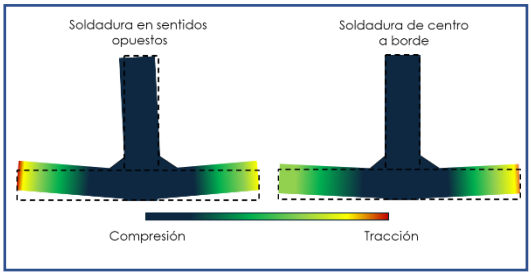


Figura 10. Comparación de dos secuencias de soldeo diferentes y su impacto en la magnitud y clasificación de esfuerzos residuales. Adaptado de Syahroni e Hidayat (2012).

CONCLUSIONES

Esta revisión bibliográfica revela avances significativos en la comprensión y la aplicación de las tecnologías del PWHT, entre los que destacan:

- Las transformaciones de fase durante el PWHT siguen una cinética previsible que puede modelarse utilizando teorías establecidas, lo que permite optimizar el proceso mediante simulación.
- Se confirma que el alivio de esfuerzos residuales no es un fenómeno únicamente térmico, sino que también depende de la conversión de deformación elástica en plástica mediante la reducción del límite elástico y el CREEP. Asimismo, la integración del TRIP actúa como un amortiguador metalúrgico crítico que permite redistribuir picos de tensión local mediante la expansión volumétrica durante los cambios de fase.
- La eficacia del PWHT es altamente sensible a la composición química; mientras que en aceros de alta resistencia (S690QL1 y S960QL) se requiere un equilibrio entre el revenido de la martensita y la retención de dureza, en aceros inoxidables austeníticos el éxito radica en el control estricto de las rampas de enfriamiento para evitar el rango de sensibilización.
- Las tecnologías emergentes EBL-PWHT, LBW-PWHT y el PWIHT representan un cambio de paradigma en eficiencia energética, logrando ahorros de hasta el 80 % y reducciones de distorsión superiores al 80 % en comparación con el PWHT convencional. Estos métodos permiten un control preciso, fundamental para la integridad de geometrías complejas y aceros de doble fase.
- La simulación computacional, apoyada por modelos como el de Norton-Bailey y herramientas como SYSWELD, se ha consolidado como una estrategia predictiva indispensable. La capacidad de predecir la fracción de fases y el estado tensional en tiempo real permite la transición hacia una manufactura proactiva, lo que elimina la dependencia de ensayos destructivos de prueba y error.

El campo de investigación del PWHT evoluciona aceleradamente, impulsado por las demandas de una mayor eficiencia energética, un mejor rendimiento y la ampliación de las aplicaciones de los materiales. El éxito de los desarrollos futuros requerirá la integración continua de la investigación fundamental, la modelización avanzada y la validación industrial para traducir los descubrimientos de laboratorio en soluciones prácticas de fabricación.

AGRADECIMIENTOS

Irving Gael Zapata Garza le agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca con número CVU 2081712 para la realización de los estudios de posgrado.

REFERENCIAS

Alipooramirabad, H., Paradowska, A., Reid, M., & Ghomashchi, R. (2022). Effects of PWHT on the residual stress and microstructure of Bisalloy 80 steel welds. *Metals, 12*(10), 1569. https://doi.org/10.3390/met12101569

Boudreault, E., Hazel, B., Coté, J., & Godin, S. (2014). In situ post-weld heat treatment on martensitic stainless steel turbine runners using a robotic induction heating process to control temperature distribution. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 22(1), 012016. https://doi.org/10.1088/1755-1315/22/1/012016

Cao, J., Wang, Y., Xu, G., Liu, X., Zeng, X., & Wei, K. (2025). Effect of post-weld induction heat treatment on single-pass high-power laser-arc hybrid welded thick stainless steel clad plate: Microstructure, mechanical properties and corrosion resistance. *Journal of Materials Research and Technology, 38*, 2623–2635. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.08.068

Chakravarthula, G. K., Quamar, M. J., Nagumothu, K. B., Venkata Guttula, S. K., Bandi, B., & Talari, M. K. (2024). Investigations of microstructure and mechanical properties of post-weld heat-treated DP780 steel TIG welds. *Fusion Science and Technology, 80*(2), 215–229. https://doi.org/10.1080/15361055.2023.2219830

Chen, F. R., Huo, L. X., Zhang, Y. F., Zhang, L., Liu, F. J., & Chen, G. F. T. (2002). Effects of electron beam local post-weld heat-treatment on the microstructure and properties of 30CrMnSiNi2A steel welded joints. *Journal of Materials Processing Technology, 129*(1–3), 412–417. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00704-5

Falodun, O., Oke, S., & Bodunrin, M. (2025). A comprehensive review of residual stresses in carbon steel welding: Formation mechanisms, mitigation strategies, and advanced post-weld heat treatment techniques. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 136*(10), 4107–4140. https://doi.org/10.1007/s00170-025-15088-8

Ferro, P., Berto, F., Bonollo, F., Romanin, L., & Salemi, G. (2020). Post welding heat treatment improving mechanical properties on Ti-6Al-4V. *Procedia Structural Integrity, 26*, 11–19. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.06.003

Goo, B.-C. (2021). Effect of post-weld heat treatment on the fatigue behavior of medium-strength carbon steel weldments. *Metals, 11*(11), 1700. https://doi.org/10.3390/met11111700

Gutiérrez Corani, H., & Quispe Coca, R. A. (2024). Tecnología de calentamiento por inducción: Eficiencia y seguridad en procesos industriales y domésticos. *Horizonte Académico, 4*(2), 11–22. https://doi.org/10.70208/3007.8245.v4.n4.15

Kellai, A., Kahla, S., Dehimi, S., Kaba, L., & Boutaghou, Z. (2022). Effect of post weld heat treatment on the microstructure and mechanical properties of a gas-tungsten-arc-welded 304 stainless steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 121*(11–12), 8171–8186. https://doi.org/10.1007/s00170-022-09896-5

Kromm, A., Lausch, T., Schroepfer, D., Rhode, M., & Kannengiesser, T. (2020a). Influence of welding stresses on relief cracking during heat treatment of a creep-resistant 13CrMoV steel: Part I—effect of heat control on welding stresses and stress relief cracking. *Welding in the World, 64*(5), 807–817 https://doi.org/10.1007/s40194-020-00875-6

Kromm, A., Lausch, T., Schroepfer, D., Rhode, M., & Kannengiesser, T. (2020b). Influence of welding stresses on relief cracking during heat treatment of a creep-resistant 13CrMoV steel Part II: Mechanisms of stress relief cracking during post weld heat treatment. Welding in the World, 64(5), 819–829. https://doi.org/10.1007/s40194-020-00881-8

Li, L., Mi, G., & Wang, C. (2019). A comparison between induction pre-heating and induction post-heating of laser-induction hybrid welding on S690QL steel. *Journal of Manufacturing Processes, 43,* 276–291. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.05.003

Liu, Z., Hu, X., Yang, Z., Yang, B., Chen, J., Luo, Y., & Song, M. (2021). Optimization study of post-weld heat treatment for 12Cr1MoV pipe welded joint. *Metals, 11*(1), 127. https://doi.org/10.3390/met11010127

Rodríguez Soca, I., Díaz Hernández, Y., Fiol Zulueta, A., & Caballero Stevens, N. (2012, noviembre). *Método para el cálculo de hornos metódicos de pozo para el revenido de aceros* [Ponencia]. Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, La Habana, Cuba. https://www.researchgate.net/publication/308417027_Metodo_para_el_calculo_de_hornos_metodicos_de_pozo_para_el_revenido_de_aceros_Metodo_para_el_calculo_de_hornos_metodicos_de_pozo_para_el_revenido_de_aceros

Seong, D., An, G., Park, J., & Woo, W. (2023). Welding residual stress distributions in the thickness direction under constraints using neutron diffraction and contour methods. *Metals, 13*(1), 25. https://doi.org/10.3390/met13010025

Sisodia, R. P. S., & Gáspár, M. (2021). Investigation of metallurgical and mechanical properties of laser beam welded and post-weld heat treated DP1400 steel. *Journal of Materials Engineering and Performance, 30*(3), 1703–1710. https://doi.org/10.1007/s11665-021-05469-x

Sisodia, R., Sliwinski, P., Koncz-Horváth, D., & Węglowski, M. St. (2024). In situ localised post-weld heat treatment with electron beam welding of S690QL steel. *Journal of Advanced Joining Processes, 9*, 100182. https://doi.org/10.1016/j.jajp.2023.100182

Sisodia, R. P. S., Sliwinski, P., Koncz-Horváth, D., & Węglowski, M. St. (2024). Influence of post-weld heat treatment on S960QL high-strength structural steel electron-beam-welded joint. *Metals, 14*(12), 1393. https://doi.org/10.3390/met14121393

Syahroni, N., & Hidayat, M. I. P. (2012). 3D finite element simulation of T-joint fillet weld: Effect of various welding sequences on the residual stresses and distortions. En M. Andriychuk (Ed.), *Numerical simulation—From theory to industry*. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/50015

Tomerlin, D., Marić, D., Kozak, D., & Samardžić, I. (2023). Post-weld heat treatment of S690QL1 steel welded joints: Influence on microstructure, mechanical properties and residual stress. *Metals, 13*(5), 999. https://doi.org/10.3390/met13050999

Xiong, J., Wang, R., Zhao, D., Liu, H., & Zhou, J. (2024). Effects of post-weld heat treatment on the microstructure and mechanical properties of automatic laser-arc hybrid welded AZ31B magnesium alloys. *Metals, 14*(7), 806. https://doi.org/10.3390/met14070806

Yang, Y. P. (2021). Recent advances in the prediction of weld residual stress and distortion—Part 1. *Welding Journal, 100*, 151-s–170-s. https://doi.org/10.29391/2021.100.013

Yu, B., Wang, P., Song, X., & Huo, S. (2022). The residual stress relief of post weld heat treatment in SMA490BW welded joints: Simulation and experiment. International *Journal of Pressure Vessels and Piping, 200,* 104852. https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2022.104852

Zhang, H., Li, R., Liu, J., Wang, K., Weijian, Q., Shi, L., Lei, L., He, W., & Wu, S. (2024). State-of-art review on the process-structure-properties-performance linkage in wire arc additive manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping, 19*(1), e2390495. https://doi.org/10.1080/17452759.2024.2390495

REVISIÓN

MODIFICACIÓN SUPERFICIAL DEL ÓXIDO DE GRAFENO MEDIANTE TRATAMIENTO CON PLASMA: UNA REVISIÓN

SURFACE MODIFICATION OF GRAPHENE OXIDE VIA PLASMA TREATMENT: A REVIEW

MORONES SILLAS, Jacqueline [1]

FLORES VILLASEÑOR, Sergio Enrique [1]

SORIA ARGÜELLO, Gustavo [2]

NEIRA VELÁZQUEZ, María Guadalupe [2]

RESUMEN

El óxido de grafeno (OG) es un material bidimensional con propiedades fisicoquímicas altamente ajustables, cuya modificación superficial resulta clave para aplicaciones avanzadas. En este contexto, los tratamientos por plasma representan una estrategia eficiente, limpia y controlable para inducir reducción, dopaje y funcionalización selectiva. Esta revisión analiza de manera comparativa el efecto de distintos tipos de plasma (H_2, O_2, N_2/NH_3, Ar, CH_4 y plasmas atmosféricos) sobre la química superficial del OG, estableciendo correlaciones entre los parámetros de proceso, los grupos funcionales introducidos o eliminados y las propiedades finales del material. Se observa que los plasmas reductores (H_2 y Ar) disminuyen el contenido de grupos oxigenados y aumentan la conductividad eléctrica, mientras que los plasmas reactivos (N_2/NH_3) inducen dopaje con nitrógeno y modifican la estructura electrónica. Por su parte, el plasma de O_2 permite controlar la densidad de grupos funcionales, y los plasmas carbonados (CH_4) contribuyen a la reparación de defectos estructurales. Finalmente, se discuten aplicaciones en sensores, membranas, electrónica flexible y biomedicina, destacando los compromisos entre la reducción, los defectos y la funcionalización. Asimismo, se analizan las limitaciones actuales en la reproducibilidad, la escalabilidad y el control fino del dopaje, así como las tendencias emergentes en el plasma atmosférico, los procesos roll-to-roll y el plasma asistido por inteligencia artificial.

Palabras clave: óxido de grafeno, plasma, modificación superficial, ingeniería de superficies, materiales bidimensionales.

1. Facultad de Metalurgia, Universidad Autónoma de Coahuila. Monclova, Coahuila, México.

2. Centro de Investigación en Química Aplicada. Saltillo, Coahuila, México.

Correspondencia
sergio.villasenor@uadec.edu.mx
https://orcid.org/0009-0002-5465-8476

Fecha de recepción
1 de diciembre de 2025.
Fecha de aceptación
5 de mayo de 2026.

ABSTRACT

Graphene oxide (OG) is a two-dimensional material with highly tunable physicochemical properties, whose surface modification is essential for advanced applications. Plasma treatments have emerged as an efficient, clean, and controllable strategy to induce reduction, heteroatom doping, and selective functionalization.

This review provides a comparative analysis of different plasma types (H_2, O_2, N_2/NH_3, Ar, CH_4, and atmospheric plasmas), establishing correlations between processing parameters, induced functional groups, and resulting material properties. Reducing plasmas reduce oxygen-containing groups and enhance electrical conductivity, while reactive plasmas enable nitrogen doping and electronic-structure modulation. Oxygen plasma enables controlled functionalization, whereas carbon-based plasmas promote defect healing and structural restoration. Applications in sensing, separation membranes, flexible electronics, energy systems, and biomedicine are discussed, highlighting trade-offs between reduction, defect generation, and functionalization. Current limitations in scalability and reproducibility are also addressed, along with future trends in atmospheric plasma, roll-to-roll processes, hybrid plasma systems, and AI-assisted optimization.

Keywords: *graphene oxide, plasma treatment, surface modification, surface engineering, two-dimensional materials.*

INTRODUCCIÓN

La modificación superficial de materiales bidimensionales mediante tratamientos por plasma se ha consolidado como una estrategia clave para ajustar de manera controlada sus propiedades electrónicas, químicas y mecánicas, con aplicaciones crecientes en sensores, electrónica flexible y biomedicina (Boulos et al., 2023; Johnson et al., 2023).

En este contexto, el óxido de grafeno (OG) ha emergido como un material de gran interés en la ingeniería de superficies debido a su elevada densidad de grupos funcionales, su facilidad de procesamiento y su compatibilidad con métodos de producción a gran escala (Mancera Zapata & Morales Narváez,

2023; Pei & Cheng, 2012). Su estructura heterogénea, compuesta por dominios sp^2 interrumpidos por grupos oxigenados, le confiere alta reactividad química y buena dispersabilidad en medios acuosos; sin embargo, esta misma oxidación reduce considerablemente su conductividad eléctrica y altera sus propiedades electrónicas (Jaramillo-Fierro & Cuenca, 2024; Xiang et al., 2022).

Se han empleado diversos métodos para modificar el OG, entre ellos la reducción química, la térmica y la electroquímica. No obstante, dichos enfoques presentan limitaciones importantes, como el uso de reactivos tóxicos, altos requerimientos energéticos, tiempos de procesamiento prolongados y escaso control de la funcionalización superficial (Politano & Versace, 2022).

En contraste, los tratamientos por plasma permiten modificar selectivamente la superficie mediante procesos secos, rápidos y altamente controlables. Dependiendo del gas empleado y las condiciones de operación, es posible inducir reducción, dopaje o funcionalización superficial, ajustando propiedades clave como conductividad eléctrica, densidad de defectos, energía superficial y biocompatibilidad (Awaja et al., 2018; Wang et al., 2016).

A pesar del creciente número de estudios sobre plasma y materiales basados en grafeno, la comprensión específica de cómo cada tipo de plasma modifica la química superficial del OG sigue fragmentada. Esto dificulta el establecimiento de criterios claros para el diseño racional y la optimización de tratamientos orientados a aplicaciones específicas. Por ello, el objetivo de esta revisión es analizar de manera sistemática el efecto de diferentes tratamientos por plasma sobre el óxido de grafeno, estableciendo relaciones entre parámetros de proceso, modificaciones estructurales inducidas y propiedades resultantes del material.

2.- FUNDAMENTOS DEL ÓXIDO DE GRAFENO

2.1 ESTRUCTURA QUÍMICA Y ELECTRÓNICA DEL OG

El óxido de grafeno es un derivado oxidado del grafeno que contiene una estructura híbrida compuesta por regiones de carbono sp^2 y sp^3 (Pei & Cheng, 2012; Xiang et al., 2022). Durante el proceso de oxidación se introducen grupos funcionales oxigenados, tales como hidroxilos, epóxidos, carbonilos y carboxilos, los cuales alteran la continuidad electrónica de la red grafítica.

La presencia de estos grupos funcionales genera defectos estructurales y reduce la movilidad electrónica del material (Jaramillo-Fierro & Cuenca, 2024). No obstante, también incrementa su reactividad química, lo que favorece procesos de funcionalización y dispersión en solventes polares.

Desde el punto de vista electrónico, la interrupción de la conjugación π modifica la densidad electrónica y abre una banda prohibida parcial, transformando al grafeno conductor en un material semiconductivo o aislante dependiendo del grado de oxidación (Politano & Versace, 2022; Xiang et al., 2022).

2.2 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL OG

El OG posee propiedades altamente ajustables mediante modificación superficial. En la figura 1 se presentan las más relevantes.

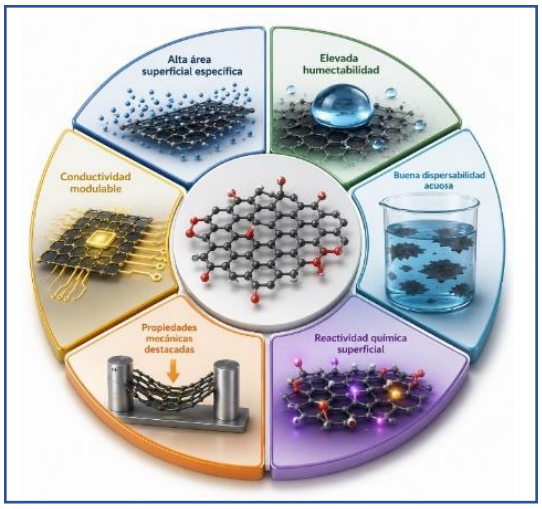


Figura 1. Propiedades del óxido de grafeno mediante modificación superficial.

3. FUNDAMENTOS DEL PLASMA APLICADOS A MATERIALES

3.1 DEFINICIÓN Y TIPOS DE PLASMA

El plasma es considerado el cuarto estado de la materia y consiste en un gas parcialmente ionizado compuesto por electrones, iones, radicales libres, especies metaestables y fotones UV (Boulos et al., 2023). Dependiendo de la temperatura y de la presión de operación, los plasmas pueden clasificarse como térmicos o no térmicos.

En aplicaciones de modificación superficial de materiales predominan los plasmas fríos o no térmicos, debido a que permiten inducir cambios químicos superficiales sin generar daño térmico significativo en el material (Awaja et al., 2018; Wang et al., 2016). Entre los sistemas más utilizados destacan el plasma de radiofrecuencia (RF), el plasma de corriente continua (DC, por sus siglas en inglés), el plasma de microondas, el plasma de descarga de barrera dieléctrica (DBD, por sus siglas en inglés) y el plasma atmosférico.

3.2 INTERACCIÓN PLASMA-SUPERFICIE

Cuando el plasma interactúa con la superficie del OG, ocurren diversos fenómenos físicos y químicos, como se presenta en la figura 2.

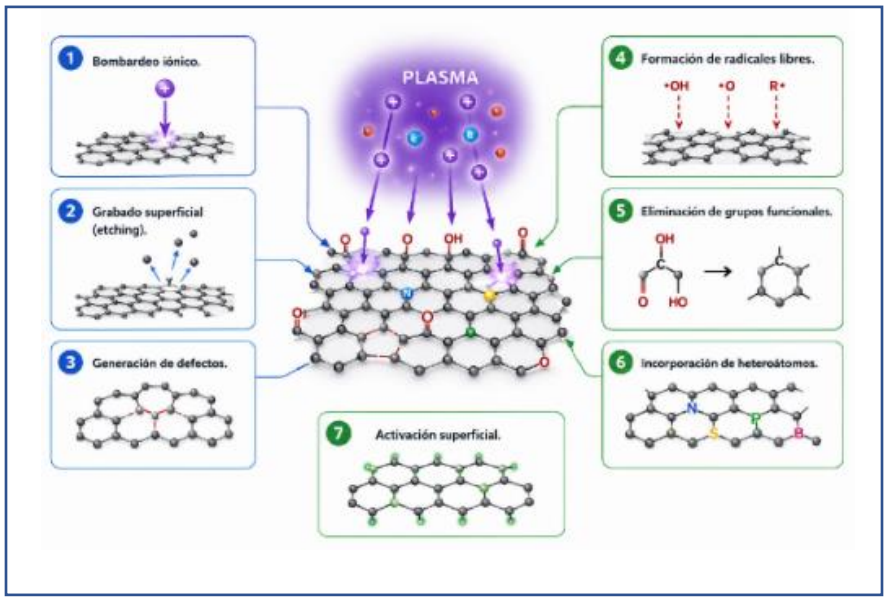


Figura 2. Propiedades del óxido de grafeno mediante modificación superficial.

Las especies activas del plasma rompen enlaces químicos superficiales y favorecen procesos de reducción, funcionalización o dopaje dependiendo de la naturaleza del gas empleado (Raza et al., 2021; Jafari et al., 2022).

3.3 PARÁMETROS CRÍTICOS DEL PROCESO

Los tratamientos con plasma dependen en gran medida de las condiciones experimentales empleadas. En la tabla 1 se muestran los parámetros más importantes.

Tabla 1. Parámetros críticos en los tratamientos por plasma y su influencia principal sobre las características fisicoquímicas y la modificación superficial de materiales.

Parámetro	Influencia principal
Potencia	Controla la energía de las especies activas
Presión	Determina densidad electrónica y colisiones
Tiempo de exposición	Regula grado de modificación superficial
Tipo de gas	Define mecanismos químicos inducidos
Temperatura	Influye en estabilidad estructural
Frecuencia	Modifica estabilidad de la descarga
Flujo de gas	Controla concentración de especies activas
Distancia electrodo-muestra	Afecta uniformidad del tratamiento

Potencias elevadas y tiempos prolongados pueden favorecer la reducción del OG; sin embargo, también incrementan la probabilidad de generar defectos estructurales excesivos (Kondratowicz et al., 2018; El-Hossary et al., 2021).

4. MODIFICACIÓN SUPERFICIAL DEL OG VÍA PLASMA

Los tratamientos con plasma constituyen una de las estrategias más versátiles y eficientes para modificar superficialmente materiales basados en carbono, en particular el óxido de grafeno (OG). La interacción entre las especies activas presentes en el plasma, como electrones, radicales libres, iones y fotones UV, y la superficie del OG permite inducir transformaciones químicas y estructurales

controladas sin afectar significativamente el volumen del material (Awaja et al., 2018; Wang et al., 2016).

Dependiendo del tipo de gas utilizado, el plasma puede promover procesos de reducción, funcionalización, dopaje, activación superficial o reparación estructural, como se observa en la figura 3. Asimismo, parámetros como potencia, presión, tiempo de exposición, flujo de gas y temperatura influyen directamente sobre el grado de modificación inducido y sobre las propiedades finales del material (Raza et al., 2021; El-Hossary et al., 2021).

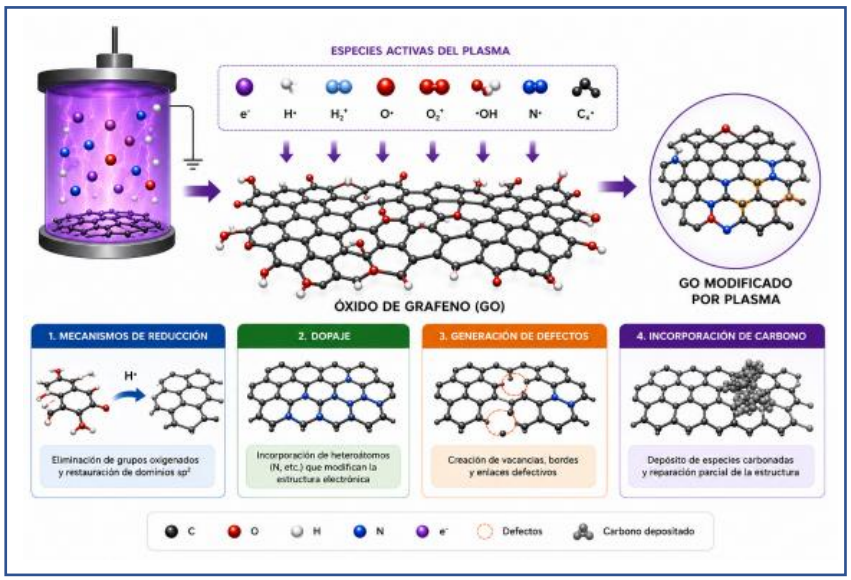


Figura 3. Interacción plasma – óxido de grafeno (OG)

En general, los mecanismos de interacción plasma–OG incluyen: eliminación de grupos funcionales oxigenados, restauración parcial de dominios sp^2, generación controlada de defectos, incorporación de heteroátomos, activación superficial, grabado superficial (etching) y reconstrucción parcial de la red grafítica.

Estas modificaciones afectan propiedades como la conductividad eléctrica, la energía superficial, la humectabilidad, la actividad catalítica y la biocompatibilidad.

4.1 Plasma de hidrógeno (H_2)

El plasma de hidrógeno es ampliamente utilizado como agente reductor debido a la elevada reactividad de los radicales H• generados durante la

descarga. Estas especies activas reaccionan con grupos funcionales oxigenados presentes en el OG, tales como epóxidos, hidroxilos, carbonilos y carboxilos, promoviendo su eliminación en forma de H_2O y otros subproductos volátiles (Pei & Cheng, 2012; Raza et al., 2021).

Como consecuencia de esta reducción, ocurre una restauración parcial de los dominios conjugados sp^2, lo que favorece la recuperación de las propiedades electrónicas del material. Diversos estudios han reportado incrementos significativos en la conductividad eléctrica del OG después de tratamientos con plasma de H_2, pasando de valores típicos del orden de 10^{-6}–10^{-7} S/cm hasta aproximadamente 10^{-2}–10^{-3} S/cm dependiendo de las condiciones experimentales (Fraih & Mutlaq, 2021; Kurtishaj Hamzaj et al., 2024).

Además de la reducción química, el plasma de hidrógeno puede inducir modificaciones morfológicas asociadas al grabado superficial y a la reorganización de los defectos. No obstante, exposiciones prolongadas o potencias elevadas pueden provocar un daño estructural excesivo y deteriorar parcialmente la red cristalina del material (Kondratowicz et al., 2018).

Entre los parámetros críticos reportados para el plasma de H_2 destacan presiones entre 10^{-1} y 10^{-3} Torr, potencias entre 20 y 200 W y tiempos de tratamiento inferiores a 30 minutos, condiciones que permiten obtener una reducción eficiente de los defectos estructurales (Raza et al., 2021).

La restauración parcial de la red sp^2 mediante plasma de H_2 ha resultado particularmente relevante en aplicaciones de sensores, electrónica flexible y dispositivos electroquímicos, donde se requieren alta conductividad eléctrica y rápida transferencia de electrones (Dey et al., 2020).

4.2 PLASMA DE ARGÓN (Ar)

El plasma de argón es una alternativa ampliamente utilizada para modificar físicamente la superficie del OG, ya que el argón es un gas químicamente inerte. En este caso, los principales mecanismos de modificación se producen mediante bombardeo iónico y pulverización superficial (*sputtering*), procesos que favorecen la remoción física de átomos y grupos funcionales superficiales (Kondratowicz et al., 2018).

El impacto de iones Ar^+ sobre la superficie del OG induce defectos estructurales, vacancias y desorden local en la red cristalina. Aunque estos defectos pueden disminuir parcialmente la movilidad electrónica, también

generan sitios activos favorables en aplicaciones catalíticas y de detección química (Raza et al., 2021).

Uno de los principales efectos del plasma de Ar es la activación superficial del material, lo que incrementa la energía superficial y favorece procesos posteriores de funcionalización química o de deposición de recubrimientos. Asimismo, el sputtering inducido puede contribuir a la eliminación parcial de grupos oxigenados y contaminantes superficiales.

Estudios recientes han demostrado que tratamientos con plasma de Ar atmosférico mejoran significativamente la humectabilidad y biocompatibilidad del OG, favoreciendo la adhesión celular y la interacción con biomoléculas (Alam et al., 2020).

Sin embargo, uno de los principales desafíos asociados con el plasma de argón es el control de la densidad de defectos generados. Potencias elevadas y tiempos excesivos pueden provocar degradación estructural severa y fragmentación de las láminas de OG (Johnson et al., 2023).

4.3 PLASMA DE OXÍGENO (O_2)

El plasma de oxígeno se emplea principalmente para inducir la oxidación controlada y la funcionalización superficial del OG. Durante la descarga se generan radicales O•, iones O_2^+ y especies excitadas, capaces de reaccionar con la superficie del material, lo que promueve la incorporación o redistribución de grupos oxigenados (El-Hossary et al., 2021).

La funcionalización inducida por plasma O_2 incrementa significativamente la humectabilidad y la energía superficial del OG, favoreciendo aplicaciones en las que se requiere una elevada interacción con medios acuosos, biomoléculas o polímeros. En muchos casos, el ángulo de contacto disminuye considerablemente tras el tratamiento, lo que indica una mayor afinidad superficial por el agua (Alam et al., 2020).

Asimismo, el plasma de oxígeno puede emplearse para generar defectos controlados y modificar selectivamente la densidad de sitios activos en la superficie del OG. Dependiendo de las condiciones experimentales, el tratamiento puede favorecer tanto la oxidación adicional como la reducción parcial del material, debido a procesos de desorción de oxígeno superficial (Kondratowicz et al., 2018).

Los sistemas RF (radiofrecuencia) de baja potencia se utilizan con especial frecuencia para evitar daños estructurales excesivos y mantener la integridad de las láminas de OG. En este contexto, El-Hossary et al. (2021) reportaron transformaciones significativas en la química superficial del OG mediante plasma frío de oxígeno de radiofrecuencia (RF).

La modificación superficial inducida por plasma de O_2 resulta especialmente relevante en aplicaciones biomédicas, membranas de separación, sensores y recubrimientos funcionales, donde la energía superficial y la interacción interfacial desempeñan un papel fundamental.

4.4 PLASMA DE NITRÓGENO Y AMONÍACO (N_2/NH_3)

Los plasmas de nitrógeno y de amoníaco se utilizan ampliamente para inducir dopaje heteroatómico en materiales basados en grafeno. Durante el tratamiento, especies activas nitrogenadas interactúan con defectos y vacancias presentes en el OG, promoviendo la incorporación de nitrógeno en configuraciones piridínicas, pirrólicas y grafíticas (Jafari et al., 2022).

El dopaje con nitrógeno modifica significativamente la estructura electrónica del material, alterando la distribución de carga y favoreciendo la transferencia de electrones. Como resultado, el OG dopado con nitrógeno presenta mejoras en la conductividad eléctrica, la actividad electrocatalítica y la estabilidad química.

La incorporación de nitrógeno también incrementa la densidad de sitios catalíticos activos para reacciones electroquímicas como reacción de reducción de oxígeno (ORR, por sus siglas en inglés) y reacción de evolución de hidrógeno (HER, por sus siglas en inglés), aplicaciones particularmente relevantes en celdas de combustible, supercapacitores y producción de hidrógeno (Jafari et al., 2022; Wang et al., 2016).

Diversos estudios han demostrado que el tipo de configuración nitrogenada depende en gran medida de parámetros como la temperatura, la potencia y la composición gaseosa. Por ejemplo, temperaturas moderadas favorecen configuraciones pirrólicas, mientras que tratamientos más energéticos promueven nitrógeno grafítico, asociado con una mayor conductividad eléctrica.

El uso de NH_3 (amoníaco) como precursor permite alcanzar niveles más altos de dopaje debido a la elevada concentración de especies reactivas nitrogenadas presentes en el plasma. Sin embargo, exposiciones prolongadas pueden inducir defectos excesivos y degradación estructural.

4.5 PLASMA CARBONADO (CH_4 Y OTROS)

Los plasmas carbonados, particularmente aquellos basados en CH_4 (metano), representan una estrategia interesante para inducir la reparación estructural y la reconstrucción parcial de la red grafítica del OG. Durante la descarga, el metano se fragmenta generando radicales y especies carbonadas reactivas que pueden incorporarse sobre defectos y vacancias presentes en el material (Baraket et al., 2016).

A diferencia de otros plasmas enfocados principalmente en reducción o funcionalización, los plasmas carbonados permiten procesos simultáneos de eliminación de oxígeno e incorporación de carbono, favoreciendo la recuperación parcial de dominios conjugados sp^2.

Baraket et al. (2016) demostraron que la presencia de un ambiente rico en carbono durante los tratamientos de plasma favorece la reconstrucción estructural del OG y mejora sus propiedades electrónicas. Este fenómeno resulta particularmente relevante para aplicaciones que requieren alta conductividad y menor densidad de defectos.

Además, algunos estudios reportan que los plasmas de hidrocarbonos pueden generar recubrimientos delgados de tipo carbono amorfo o grafítico sobre la superficie del OG, modificando sus propiedades tribológicas, eléctricas y químicas.

Sin embargo, el control preciso de la incorporación de carbono continúa siendo un desafío importante, debido a la complejidad de los mecanismos de deposición y crecimiento superficial asociados al plasma.

4.6 COMPARACIÓN ENTRE TIPOS DE PLASMA

La modificación superficial mediante plasma ha demostrado ser una estrategia efectiva para mejorar las propiedades fisicoquímicas de materiales carbonosos, debido a la diversidad de mecanismos que pueden inducirse según el gas empleado (Awaja et al., 2018; Wang et al., 2016). En la tabla 2

se presenta una comparación de los principales tipos de plasma utilizados, considerando su efecto dominante, beneficios, desventajas y aplicaciones más relevantes.

Tabla 2. Comparación de los principales tipos de plasma.

Plasma	Efecto dominante	Ventajas	desventajas	Aplicaciones
H_2	Reducción	Incrementa conductividad	Puede generar defectos	Sensores, electrónica
Ar	Bombardeo iónico	Activación superficial	Daño estructural	Emisión de campo
O_2	Funcionalización	Mayor humectabilidad	Sobreoxidación	Biomateriales
N_2/NH_3	Dopaje	Mejora catalítica	Control complejo	Catálisis
CH_4	Reparación estructural	Reconstrucción sp^2	Baja uniformidad	Electrónica

5. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN DEL OG MODIFICADO

La caracterización estructural, química y morfológica del óxido de grafeno modificado mediante plasma es fundamental para comprender los cambios inducidos durante el tratamiento y establecer relaciones entre los parámetros de procesamiento y las propiedades finales del material. Debido a la complejidad de los mecanismos plasma–superficie, normalmente se requiere el uso complementario de múltiples técnicas analíticas capaces de evaluar la composición química, la densidad de defectos, la morfología, la rugosidad y las propiedades eléctricas.

5.1 ESPECTROSCOPÍA RAMAN

La espectroscopía Raman es una de las técnicas más utilizadas para analizar defectos estructurales y dominios sp^2 en materiales basados en grafeno (Xiang et al., 2022). Esta técnica proporciona información relevante acerca del orden cristalino, densidad de defectos y grado de restauración electrónica inducida por tratamientos de plasma.

En materiales derivados de grafeno, las bandas Raman más importantes son la D (~1350 cm^{-1}), asociada a defectos estructurales y desorden, y la G (~1580 cm^{-1}), relacionada con vibraciones de carbonos sp^2. La relación de

intensidades ID/IG se emplea ampliamente para evaluar el grado de defectos generado o eliminado durante el tratamiento por plasma.

Tratamientos reductores con H_2 suelen disminuir parcialmente la relación ID/IG debido a la restauración de dominios grafíticos, mientras que plasmas más energéticos o procesos de sputtering pueden incrementar significativamente la densidad de defectos (Kondratowicz et al., 2018; Raza et al., 2021).

Asimismo, desplazamientos en la posición de las bandas Raman pueden indicar tensiones estructurales, dopaje heteroatómico o modificaciones electrónicas inducidas por el plasma.

5.2 ESPECTROSCOPÍA FOTOELECTRÓNICA DE RAYOS X (XPS)

La espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS) permite cuantificar grupos funcionales y determinar la composición química superficial, incluyendo niveles de dopaje con nitrógeno u oxígeno (El-Hossary et al., 2021).

Debido a que XPS es altamente sensible a la superficie, esta técnica resulta particularmente útil para estudiar modificaciones inducidas por plasma, que generalmente ocurren en los primeros nanómetros del material.

El análisis de los espectros C 1s permite identificar enlaces C–C, C–O, C=O y O–C=O, mientras que los espectros N 1s permiten diferenciar configuraciones nitrogenadas, como nitrógeno piridínico, pirrólico y grafítico, en materiales dopados.

La reducción del OG mediante plasma suele traducirse en una disminución de la relación O/C, lo que indica la eliminación de grupos oxigenados y la restauración parcial de la red conjugada (Raza et al., 2021).

Además, XPS permite evaluar la eficiencia de la funcionalización superficial, la incorporación de heteroátomos y la estabilidad química después del tratamiento.

5.3 FTIR

La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) se utiliza para identificar grupos funcionales superficiales, como hidroxilos, carbonilos y epóxidos (Jaramillo-Fierro & Cuenca, 2024).

Esta técnica resulta especialmente útil para monitorear cambios químicos inducidos por plasma, ya que las variaciones en la intensidad o desaparición de bandas características permiten identificar procesos de reducción o funcionalización.

Por ejemplo, los tratamientos reductores disminuyen la intensidad de las bandas asociadas a grupos oxigenados, mientras que los plasmas oxidativos pueden incrementar las señales relacionadas con enlaces C–O y O–H.

Asimismo, la FTIR permite evaluar interacciones químicas entre el OG tratado y otras moléculas, polímeros o biomateriales en aplicaciones compuestas y biomédicas.

5.4 SEM/TEM

La microscopía electrónica de barrido (SEM) y la microscopía electrónica de transmisión (TEM) permiten evaluar la morfología superficial, los defectos y los cambios estructurales inducidos por plasma (Awaja et al., 2018).

SEM proporciona información sobre la rugosidad superficial, la aglomeración de láminas y los cambios morfológicos ocasionados por procesos de grabado o sputtering. En muchos casos, tratamientos de plasma generan superficies más rugosas y activadas, lo cual incrementa el área superficial efectiva.

Por otra parte, TEM permite observar directamente defectos, bordes, vacancias y reorganización de dominios cristalinos a escala nanométrica.

En tratamientos agresivos, la TEM puede evidenciar fragmentación parcial de las láminas de OG y aumento de la densidad de defectos, mientras que tratamientos controlados pueden favorecer la restauración parcial de regiones grafíticas (Baraket et al., 2016).

5.5 MICROSCOPÍA DE FUERZA ATÓMICA (AFM)

La microscopía de fuerza atómica (AFM) proporciona información detallada sobre la rugosidad superficial, el espesor y la distribución topográfica de las láminas de OG. Esta técnica resulta particularmente útil para evaluar cambios morfológicos inducidos por plasma a escala nanométrica, lo que permite identificar fenómenos de grabado, exfoliación, fragmentación o deposición superficial posteriores al tratamiento. Las variaciones en la rugosidad y el

espesor se relacionan directamente con modificaciones en la energía superficial, la adhesión celular y el transporte electrónico, aspectos relevantes en aplicaciones biomédicas y electrónicas (Alam et al., 2020; Awaja et al., 2018; Johnson et al., 2023).

5.6 MEDIDAS ELÉCTRICAS Y ÁNGULO DE CONTACTO

Las mediciones eléctricas permiten analizar cambios en la conductividad y la resistencia superficial, mientras que el ángulo de contacto evalúa modificaciones en la humectabilidad y la energía superficial (Alam et al., 2020; Fraih & Mutlaq, 2021). La reducción del OG mediante plasma normalmente produce incrementos significativos en conductividad eléctrica debido a la restauración parcial de dominios sp^2 y disminución de grupos oxigenados aislantes; en contraste, tratamientos oxidativos pueden incrementar la resistencia superficial debido al aumento de grupos funcionales y defectos estructurales (Pei & Cheng, 2012; Raza et al., 2021).

Por otra parte, las mediciones de ángulo de contacto permiten evaluar cambios en la hidrofilicidad superficial, ya que plasmas oxidativos generalmente disminuyen el ángulo de contacto e incrementan la afinidad con agua y biomoléculas. Estas propiedades resultan fundamentales en aplicaciones de membranas, biomateriales y sensores, donde la interacción interfacial desempeña un papel crítico (El-Hossary et al., 2021; Tabarsa & ZareNezhad, 2021; Zhang et al., 2025).

6. RELACIÓN ENTRE MODIFICACIÓN SUPERFICIAL Y PROPIEDADES

Las modificaciones inducidas por plasma en el OG generan cambios significativos en las propiedades estructurales, electrónicas, químicas y superficiales. La naturaleza de estas modificaciones depende directamente del tipo de plasma utilizado y de los parámetros operativos empleados durante el tratamiento.

6.1 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

La reducción de grupos oxigenados mediante plasma favorece la restauración parcial de dominios sp^2 y el incremento de la conductividad eléctrica (Pei & Cheng, 2012; Raza et al., 2021).

En materiales basados en OG, los grupos funcionales oxigenados interrumpen la conjugación electrónica y limitan el transporte de carga. Por ello, tratamientos reductores, como el plasma de H_2 o de Ar, contribuyen a recuperar parcialmente la movilidad electrónica del material.

Diversos estudios reportan incrementos de varios órdenes de magnitud en la conductividad eléctrica tras el tratamiento con plasma, particularmente en sistemas de RF (radiofrecuencia) y de baja presión (Fraih & Mutlaq, 2021).

Sin embargo, la mejora en la conductividad debe balancearse cuidadosamente con la generación de defectos estructurales, ya que exposiciones excesivas pueden deteriorar el transporte electrónico.

6.2 DENSIDAD DE DEFECTOS

Los tratamientos con plasma pueden incrementar los defectos estructurales según la potencia y el tiempo de exposición (Kondratowicz et al., 2018).

La generación de defectos ocurre principalmente mediante el bombardeo iónico, el sputtering y la ruptura de enlaces químicos superficiales. Estos defectos incluyen vacancias, bordes expuestos y regiones amorfas.

Aunque una elevada densidad de defectos puede afectar negativamente las propiedades electrónicas, también puede resultar beneficiosa para aplicaciones catalíticas y de sensores debido al aumento de sitios activos superficiales.

El control preciso de la densidad de defectos constituye uno de los principales desafíos de la ingeniería de superficies basada en plasma.

6.3 ENERGÍA SUPERFICIAL

La incorporación de grupos funcionales modifica significativamente la energía superficial y la interacción con fluidos o biomoléculas (El-Hossary et al., 2021).

Los tratamientos oxidativos incrementan los grupos polares superficiales, favoreciendo la humectabilidad, la adhesión interfacial y la estabilidad coloidal, aspectos fundamentales en membranas, recubrimientos funcionales y materiales biomédicos. En contraste, los tratamientos reductores disminuyen parcialmente la hidrofilicidad debido a la eliminación de grupos oxigenados, modificando la dispersabilidad y la compatibilidad con matrices poliméricas (Awaja et al., 2018; Tabarsa & ZareNezhad, 2021; Zhang et al., 2025).

6.4 BIOCOMPATIBILIDAD

Los tratamientos oxidativos y atmosféricos favorecen una mayor compatibilidad celular y adhesión biológica (Alam et al., 2020). La incorporación controlada de grupos funcionales oxigenados mejora la interacción con proteínas, biomoléculas y tejidos biológicos, lo que favorece su aplicación en ingeniería tisular, en biosensores y en sistemas de liberación controlada de fármacos. Asimismo, la modificación superficial mediante plasma permite reducir contaminantes químicos asociados a métodos tradicionales de funcionalización, mejorando la estabilidad biológica y la respuesta celular; sin embargo, una elevada densidad de defectos o de residuos reactivos podría inducir efectos citotóxicos, dependiendo de las condiciones de tratamiento empleadas (Alam et al., 2020; Awaja et al., 2018; Navas-Pinto et al., 2025).

6.5 ACTIVIDAD CATALÍTICA

El dopaje con nitrógeno y la generación controlada de defectos incrementan la actividad catalítica en reacciones electroquímicas (Jafari et al., 2022; Wang et al., 2016). Los defectos estructurales y heteroátomos introducidos mediante plasma actúan como sitios activos capaces de favorecer la adsorción y la transferencia de electrones durante procesos catalíticos, particularmente en las reacciones ORR y HER relacionadas con celdas de combustible y la electrólisis del agua. Asimismo, el control de los defectos y de la funcionalización superficial permite optimizar selectividad, estabilidad catalítica y eficiencia electroquímica, favoreciendo el desarrollo de electrocatalizadores libres de metales nobles basados en OG modificado por plasma (Dey et al., 2020; Jafari et al., 2022; Johnson et al., 2023).

7. APLICACIONES DEL OG MODIFICADO POR PLASMA

La modificación superficial del OG mediante plasma ha permitido ampliar significativamente sus aplicaciones tecnológicas gracias a la capacidad de ajustar de manera controlada sus propiedades electrónicas, químicas y superficiales.

7.1 SENSORES

La modificación superficial mediante plasma permite mejorar la sensibilidad, la selectividad y la estabilidad en sensores químicos y electroquímicos (Kurtishaj Hamzaj et al., 2024). La generación de defectos, la incorporación de grupos funcionales y el dopaje heteroatómico incrementan la interacción entre la superficie del OG y las especies químicas objetivo, favoreciendo procesos de adsorción y transferencia electrónica. Gracias a estas propiedades, los materiales basados en OG tratado por plasma han mostrado aplicaciones prometedoras en sensores para aplicaciones ambientales y biomédicas, así como en sensores de gases como NH_3, NO_2 y O_2 (Fraih & Mutlaq, 2021; Wang et al., 2016).

7.2 ELECTRÓNICA FLEXIBLE

La restauración parcial de la red sp^2 incrementa la conductividad y favorece su aplicación en dispositivos flexibles (Dey et al., 2020). Los tratamientos por plasma permiten obtener películas conductoras con elevada flexibilidad, estabilidad mecánica y buena transparencia óptica, características fundamentales en dispositivos electrónicos flexibles y optoelectrónicos. Además, la modificación controlada de la función de trabajo y densidad electrónica permite optimizar el transporte de carga en transistores flexibles, electrodos transparentes y dispositivos wearables (Johnson et al., 2023; Politano & Versace, 2022).

7.3 MEMBRANAS Y SEPARACIÓN

Los cambios en la humectabilidad y la funcionalización permiten controlar la permeabilidad y la selectividad (Jafari et al., 2022; Zhang et al., 2025). La modificación superficial inducida por plasma permite ajustar el tamaño de poro, la interacción molecular y el transporte selectivo de especies químicas,

propiedades particularmente relevantes en la separación de gases, la purificación de agua y las membranas industriales. Asimismo, el incremento de la estabilidad química y de la dispersabilidad superficial favorece la integración del OG modificado en membranas compuestas y sistemas avanzados de filtración (Tabarsa & ZareNezhad, 2021).

7.4 BIOMEDICINA

Los tratamientos por plasma mejoran la interacción celular, la biocompatibilidad y la funcionalización biomolecular (Alam et al., 2020). La incorporación controlada de grupos funcionales favorece la adhesión celular, la inmovilización de biomoléculas y la compatibilidad con tejidos biológicos, lo que permite aplicaciones en ingeniería tisular, biosensores, liberación controlada de fármacos y recubrimientos antibacterianos. Además, la posibilidad de modificar superficialmente el OG sin recurrir a reactivos químicos tóxicos representa una ventaja importante frente a métodos convencionales (Awaja et al., 2018; Navas-Pinto et al., 2025).

7.5 ENERGÍA Y CATÁLISIS

Los materiales modificados por plasma muestran aplicaciones prometedoras en supercapacitores, en la ORR (reacción de reducción de oxígeno), en la HER (reacción de evolución de hidrógeno) y en la reducción electroquímica de CO_2 (Wang et al., 2016; Jafari et al., 2022). El incremento de defectos controlados y el dopaje heteroatómico favorecen procesos de transferencia electrónica, actividad electrocatalítica y estabilidad electroquímica, mejorando el desempeño en sistemas de almacenamiento y conversión energética. Asimismo, el desarrollo de electrocatalizadores basados en OG dopado mediante plasma representa una alternativa prometedora para tecnologías energéticas sostenibles y dispositivos electroquímicos avanzados (Dey et al., 2020; Johnson et al., 2023).

8. LIMITACIONES Y DESAFÍOS ACTUALES

A pesar de sus ventajas, los tratamientos con plasma presentan diversas limitaciones técnicas y científicas. Uno de los principales desafíos es el daño estructural excesivo causado por el bombardeo iónico prolongado, que puede

deteriorar la red cristalina del OG y afectar sus propiedades electrónicas (Kondratowicz et al., 2018).

Asimismo, la reproducibilidad entre sistemas de plasma continúa siendo limitada debido a diferencias en la geometría de los reactores, la potencia, la presión y la composición gaseosa (Wang et al., 2016).

La escalabilidad industrial también representa un reto importante, particularmente en sistemas de vacío de gran superficie. Además, algunos procesos presentan costos operativos elevados asociados al consumo energético y al control atmosférico.

Otro desafío relevante es el control fino del dopaje y la funcionalización superficial, especialmente cuando se busca uniformidad química en aplicaciones electrónicas o biomédicas.

9. TENDENCIAS FUTURAS

Las investigaciones recientes muestran un creciente interés en sistemas de plasma atmosférico continuo debido a su potencial de escalabilidad y menor costo operativo.

Asimismo, los procesos roll-to-roll representan una alternativa prometedora para la producción industrial de materiales basados en grafeno superficialmente modificados.

Otra tendencia emergente es el desarrollo de plasmas híbridos, capaces de combinar reducción, dopaje y funcionalización en un único proceso.

La integración de inteligencia artificial y aprendizaje automático para optimizar parámetros del plasma también está adquiriendo relevancia, lo que permite correlacionar las condiciones de operación con las propiedades finales del material (Johnson et al., 2023).

Finalmente, el uso de heteroestructuras 2D híbridas basadas en OG y otros materiales bidimensionales abre nuevas oportunidades en el ámbito de la energía, la fotónica y la nanoelectrónica.

CONCLUSIONES

Los tratamientos con plasma constituyen una herramienta versátil y altamente controlable para modificar la superficie del óxido de grafeno.

A lo largo de esta revisión se estableció una relación clara entre el tipo de plasma empleado, los cambios en la química superficial y las propiedades resultantes del material. Se identificó que los plasmas reductores favorecen la eliminación de grupos oxigenados y el incremento de la conductividad eléctrica, mientras que los plasmas reactivos permiten la incorporación controlada de grupos funcionales y heteroátomos.

Asimismo, se evidenció un compromiso entre la reducción del material y la generación de defectos, aspecto que debe controlarse cuidadosamente según la aplicación final.

Finalmente, las tendencias emergentes relacionadas con plasma atmosférico, inteligencia artificial y manufactura continua posicionan a esta tecnología como una alternativa prometedora para el desarrollo de materiales avanzados.

REFERENCIAS

Alam, K., Jo, Y. Y., Park, C.-K., & Cho, H. (2020). Synthesis of graphene oxide using atmospheric plasma for prospective biological applications. *International Journal of Nanomedicine, 15,* 5813–5824. https://doi.org/10.2147/IJN.S254860

Awaja, F., Tripathi, M., Wong, T. T., O'Brien, T., & Speranza, G. (2018). The chemistry and topography of stabilized and functionalized graphene oxide coatings. *Plasma Processes and Polymers, 15*(10), 1800084. https://doi.org/10.1002/ppap.201800084

Baraket, M., Boris, D. R., Wei, Z., Sheehan, P. E., & Walton, S. G. (2016). *On the significance of a carbon-rich background in plasma-based graphene oxide reduction* (Report No. NRL/MR/6750--16-9682). Naval Research Laboratory.

Boulos, M. I., Fauchais, P. L., & Pfender, E. (2023). The plasma state. En M. I. Boulos, P. L. Fauchais, & E. Pfender (Eds.), *Handbook of thermal plasmas* (pp. 3–55). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-84936-8_1

Dey, A., Ghosh, P., Bowen, J., Braithwaite, N. St. J., & Krishnamurthy, S. (2020). Engineering work function of graphene oxide from p to n type using a low power atmospheric pressure plasma jet. *Physical Chemistry Chemical Physics, 22*(15), 7685–7698. https://doi.org/10.1039/C9CP06174F

El-Hossary, F. M., Ghitas, A., Abd El-Rahman, A. M., Ebnalwaled, A. A., Shahat, M. A., & Fawey, M. H. (2021). Cold RF oxygen plasma treatment of graphene oxide films. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 32*(12), 15718–15731. https://doi.org/10.1007/s10854-021-06123-x

Fraih, A. J., & Mutlaq, H. M. (2021). Controlled reduction of graphene oxide via hydrogen plasma for tuning sensitivity and recovery time of rGo based oxygen gas sensor. *The European Physical Journal Applied Physics, 95*(3), 30101. https://doi.org/10.1051/epjap/2021210108

Jafari, A., Mortaheb, H. R., & Gallucci, F. (2022). Plasma treatment for enhanced functionalization of graphene nanosheets by octadecylamine. *Chemical Engineering Research and Design, 187*, 251–260. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.08.054

Jaramillo-Fierro, X., & Cuenca, G. (2024). Theoretical and experimental analysis of hydroxyl and epoxy group effects on graphene oxide properties. *Nanomaterials, 14*(8), 714. https://doi.org/10.3390/nano14080714

Johnson, T., Wang, K., Fan, Q. H., & Lee, A. (2023). Plasma modification of graphene nanoplatelets surfaces. *Discover Nano, 18*(1), 144. https://doi.org/10.1186/s11671-023-03929-y

Kondratowicz, I., Nadolska, M., Şahin, S., Łapiński, M., Prześniak-Welenc, M., Sawczak, M., Yu, E. H., Sadowski, W., & Żelechowska, K. (2018). Tailoring properties of reduced graphene oxide by oxygen plasma treatment. *Applied Surface Science, 440*, 651–659. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.01.168

Kurtishaj Hamzaj, A., Donà, E., Santhosh, N. M., Shvalya, V., Košiček, M., & Cvelbar, U. (2024). Plasma-modification of graphene oxide for advanced ammonia sensing. *Applied Surface Science, 660*, 160006. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.160006

Mancera Zapata, D. L., & Morales Narváez, E. (2023). A biosensing platform based on graphene oxide and photoluminescent probes: Advantages and perspectives. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología, 16*(31), 1e–12e. https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2023.31.69798

Navas-Pinto, W., Cree, D. E., Wilson, L. D., Barrionuevo, G. O., Sánchez-Sánchez, X., & Calvopiña, H. (2025). Characterization of graphene oxide synthesized through a modified Hummers method. *Ingenius*, (34), 31–42. https://doi.org/10.17163/ings.n34.2025.03

Pei, S., & Cheng, H.-M. (2012). The reduction of graphene oxide. *Carbon, 50*(9), 3210–3228. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2011.11.010

Politano, G. G., & Versace, C. (2022). Electrical and optical characterization of graphene oxide and reduced graphene oxide thin films. *Crystals, 12*(9), 1312. https://doi.org/10.3390/cryst12091312

Raza, M. M. H., Khan, S., Aalam, S. M., Sadiq, M., Sarvar, M., Zulfequar, M., Husain, S., & Ali, J. (2021). Study the electron field emission properties of plasma-based reduction of graphene oxide (GO): An ex-situ plasma approach. *Carbon Trends, 5*, 100127. https://doi.org/10.1016/j.cartre.2021.100127

Tabarsa, M., & ZareNezhad, B. (2021). An eco-friendly air–water plasma surface treatment technique for improving the stability of graphene oxide nanosheets in aqueous solutions. *Materials Today Communications, 26*, 101940. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101940

Wang, X., Fan, Q., Chen, Z., Wang, Q., Li, J., Hobiny, A., Alsaedi, A., & Wang, X. (2016). Surface modification of graphene oxides by plasma techniques and their application for environmental pollution cleanup. *The Chemical Record, 16*(1), 295–318. https://doi.org/10.1002/tcr.201500223

Xiang, X., Zhu, Y., Gao, C., Du, H., & Guo, C. (2022). Study on the structure of reduced graphene oxide prepared by different reduction methods. *Carbon Letters, 32*(2), 557–566. https://doi.org/10.1007/s42823-021-00287-6

Zhang, P., Wang, Q., Zhang, Y., Lin, M., Zhou, X., David, A., Ustyuzhanin, A., Chen, M., Katsnelson, M. I., Trubyanov, M., Novoselov, K. S., & Andreeva, D. V. (2025). Strain-induced crumpling of graphene oxide lamellas to achieve fast and selective transport of H_2 and CO_2. *Nature Nanotechnology, 20*(9), 1254–1261. https://doi.org/10.1038/s41565-025-01971-8

REVISIÓN

FIBRAS NATURALES COMO REFUERZO: PERSPECTIVAS EN CEMENTOS ALTERNATIVOS

NATURAL FIBERS AS REINFORCEMENT: PERSPECTIVES IN ALTERNATIVE CEMENTS

PEÑA MONSIVÁIS, Miranda Elizabeth[1]

GALLARDO HEREDIA, Marisol[1]

GARCÍA LOBATO, Marco Antonio[1]

MALDONADO, Yadira Guadalupe[2]

RESUMEN

Para reducir los efectos nocivos debidos a las altas emisiones de dióxido de carbono (CO^2) generadas durante el proceso de fabricación del cemento Portland (CP), estimadas en un 8 % anual a nivel mundial, se presenta como alternativa el desarrollo de un material cementante sostenible con base en cemento de sulfoaluminato de calcio (SAC) y fibras naturales provenientes de residuos agroindustriales: cáscara de coco (CC), hojas de piña (HP) y tallo de lechuguilla de agave (LA), como refuerzo. El uso del SAC disminuye el consumo energético, fomentando un rápido desarrollo de la resistencia desde etapas tempranas del curado, así como una mayor durabilidad del material expuesto a ambientes agresivos, como los cloruros o los sulfatos. Por su parte, el uso de las fibras lignocelulósicas mejora la resistencia a la flexión y la ductilidad, actuando como elementos de control de fisuras. Los retos principales por resolver, incluyendo la alta absorción de agua y la degradación química en el medio alcalino de la matriz, se abordan mediante modificaciones superficiales y tratamientos químicos. Este nuevo material representa una solución viable que contribuye a la descarbonización y fomenta el desarrollo de la economía circular.

Palabras clave: *cemento de sulfoaluminato de calcio (SAC); economía circular; fibras naturales (FN); materiales de construcción.*

1. Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila. Saltillo, Coahuila, México.
2. Centro Nacional de Metrología CENAM. El Marqués, Querétaro, México.

ABSTRACT

To reduce the environmental impact of high carbon dioxide (CO^2) emissions from Portland cement (PC) production, which accounts for 8 % of global emissions annually, the development of a sustainable cementitious material based on calcium sulfoaluminate (CSA) cement, and natural fibers (NF) derived from agro-industrial residues is presented. Three types of reinforcements were

Correspondencia
marisol.gallardo@uadec.edu.mx
https://orcid.org/0000-0003-4333-7984

Fecha de recepción
14 de enero de 2026.
Fecha de aceptación
16 de junio de 2026.

Este artículo fue sometido a revisión por pares doble ciego

analyzed: coconut husk (CC), pineapple leaves (PL), and agave lechuguilla stalk (LA). The use of CSA cement reduces energy consumption and promotes rapid early-age strength development and enhanced durability in aggressive environments. Simultaneously, the incorporation of lignocellulosic fibers improves flexural strength and ductility by acting as crack-control elements. Key technical challenges, such as high-water absorption and chemical degradation in the alkaline matrix, are addressed through surface chemical treatments. This material offers a viable solution for decarbonization while fostering a circular-economy model for construction materials.

Keywords: *calcium sulphoaluminate cement (CSA), circular economy, natural fibers (NF), building materials.*

INTRODUCCIÓN

El crecimiento urbano y la demanda de infraestructura proyectan una producción de cemento Portland (CP) de 4.4 mil millones de toneladas para 2025. Este volumen genera un impacto ambiental crítico, con emisiones de dióxido de carbono (CO_2) estimadas entre 0.8 y 0.9 toneladas por cada tonelada de cemento producido. Ante este panorama, la industria busca alternativas sostenibles que reduzcan la huella de carbono sin comprometer las propiedades mecánicas y la durabilidad de los materiales (Negrão, 2022).

La presente investigación propone el uso de cementos de sulfoaluminato de calcio (SAC) reforzados con fibras naturales (FN) provenientes de residuos agroindustriales. Se analiza cómo la incorporación de estos refuerzos lignocelulósicos puede mejorar la tenacidad del material, ofreciendo una alternativa competitiva y viable frente a los refuerzos tradicionales (Lertwattanaruk & Suntijitto, 2015).

METODOLOGÍA

Se llevó a cabo una revisión narrativa de la literatura científica técnica. La búsqueda de información se realizó en las bases de datos Scopus, ScienceDirect y Google Scholar, abarcando el periodo de 2015 a 2026. Los criterios de selección se centraron en estudios sobre el desarrollo de cementos

de sulfoaluminato de calcio (SAC) y el aprovechamiento de fibras naturales de coco, piña y agave como refuerzo sustentable en matrices cementantes descarbonizadas.

CONTEXTO ACTUAL Y DESAFÍOS DE LA INDUSTRIA CEMENTERA

Los problemas generados por el creciente impacto ambiental de la industria cementera han sido el detonante para el desarrollo de diversos estudios que buscan combatir esta problemática con materiales cementantes alternativos como una sustitución parcial o total del cemento Portland. Entre los objetivos principales han destacado la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, disminución de las altas demandas de energía de la industria, combate de la sobreexplotación de recursos naturales, desarrollo de buenas propiedades mecánicas, evaluación de la durabilidad, trabajabilidad, entre otros (Navarro Ferrer, 2022).

CEMENTOS ALTERNATIVOS Y LA DESCARBONIZACIÓN

Al ser un material con tan alta demanda, es importante analizar a profundidad los efectos provocados por la industria del cemento tradicional tanto en el pasado como en el presente. Se puede comprender que son necesarios cambios en el proceso de producción.

Al reestructurar los materiales usados como base, así como los procesos energéticos, se podrá reducir el impacto ambiental de manera eficiente, ya que no es posible hacer un cambio significativo sin reemplazar los dos factores de impacto más importantes:

1. El gasto energético relacionado con el proceso de clinkerización
2. Las altas emisiones de CO_2 derivadas de la descarbonatación de la caliza ($CaCO_3$), producidas por la reacción $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$ (Bizzozero et al., 2011).

De manera general, las líneas de investigación consultadas para el desarrollo de cementos alternativos pueden agruparse en tres grupos:

1. Sistemas de activación alcalina (incluyendo el desarrollo de materiales geopoliméricos). En la elaboración de estos sistemas se

incluye una diversidad de materiales como materias primas: desde subproductos industriales como las cenizas volantes, distintos tipos de desechos urbanos, e incluso fuentes naturales de silicoaluminatos como las arcillas calcinadas. Los precursores reaccionan con soluciones alcalinas a temperaturas inferiores a las necesarias para el proceso de clinkerización del CP, con reducciones potenciales de las emisiones de CO_2 hasta un 80 % y con propiedades mecánicas competitivas (Correa-Zeña et al., 2023).

2. Cementos con adiciones puzolánicas. Estos cementos se consideran como una sustitución parcial de los cementos tradicionales, el objetivo es reducir el contenido de clínker al hacer una incorporación de materiales como lo son algunos subproductos industriales, entre ellos la escoria de alto horno, o bien materiales naturales con baja calcinación. De esta forma, se reduce la huella de carbono y se aprovecha el uso de materias primas que, de no reutilizarse, podrían terminar en vertederos y aumentar la contaminación.

3. Cementos a base de sulfoaluminato de calcio (SAC). Este tipo de cementos se caracteriza por sus bajos requerimientos de carbonatos de calcio en las materias primas necesarias para su clinkerización, un rápido desarrollo de su resistencia mecánica, tiempos de fraguado cortos y temperaturas de manufactura entre 1110 °C y 1250 °C. El SAC destaca por su eficiencia térmica, ya que su síntesis requiere temperaturas significativamente menores que los 1450 °C del cemento Portland tradicional. Esta reducción térmica, junto con el menor uso de caliza, permite disminuir las emisiones de CO_2 hasta en un 40 %, lo que valida su viabilidad como material descarbonizado (tabla 1). Se pueden utilizar distintas fuentes de materias primas como minerales naturales, desechos o subproductos industriales, además de yesos, escorias o ceniza (Gallardo Heredia et al., 2016).

Tabla 1. Comparativa de propiedades mecánicas y ambientales: SAC vs. CP.

Parámetro	Cemento Portland (CP)	Cemento Sulfoaluminato de Calcio (SAC)
Temperatura de clinkerización	~1450 °C	1110 °C–1250 °C
Emisiones de dióxido de carbono (CO_2)	0.8-0.9 t/t	~0.5 (reducción del 35 %–40 %)
Fase principal	Alita y belita	Yeélimita (C_4A_3S)
Contenido de caliza ($CaCO_3$)	Elevado	Bajo

CARACTERIZACIÓN Y PROPIEDADES MECÁNICAS DEL SAC

El SAC se caracteriza por ser un material ligante de fraguado rápido, con tiempos entre los 12 y los 180 minutos. Durante este periodo alcanza un endurecimiento notable, dependiendo de la formulación y adición de retardantes. Sin embargo, se considera que su resistencia a la compresión (RC) en etapas iniciales se desarrolla entre 60 min y 24 h de fraguado (Li et al., 2025).

La RC de los SAC a 1 día de fraguado puede superar en un 25–30 % los valores presentados por un cemento Portland compuesto (CPC). Sin embargo, se ha observado que, a los 28 días de curado, este valor puede alcanzar valores de 35 y 55 Mpa.

La fase principal del clínker del SAC es la yeélimita (C4A3S), cuya estructura cristalina (figura 1) es responsable del rápido fraguado y de la formación de etringita durante la hidratación. Esta configuración atómica permite una red densa que favorece la adhesión interfacial con los refuerzos lignocelulósicos, optimizando la transferencia de esfuerzos en el material compuesto. Además presenta fases secundarias como Belita, Mayenita y Ferrita (tabla 2) (Tanguler-Bayramtan et al., 2024).

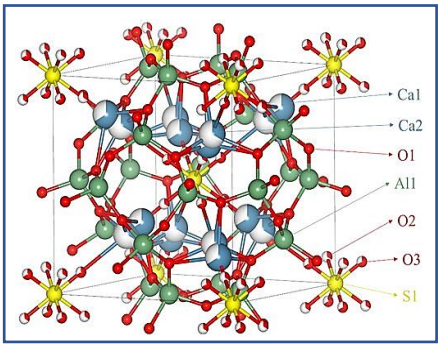


Figura 1. Esquema de la estructura cristalina de la Yeélimita.
Tomado de Wu et al. (2024).

Tabla 2. Principales fases cristalinas presentes en el SAC.

Fase cristalina	Nomenclatura	Estructura y función
Yeélimita	C_4A_3S	Responsable primaria del rápido desarrollo de propiedades y del rápido fraguado.
Belita	C_2S	Aporta principalmente la resistencia final a largo plazo.
Mayenita	$Ca_{12}Al_{14}O_{33}$	Determina junto con la Yeélimita, la resistencia inicial y el tiempo de fraguado.
Ferrítica	C_4AF	Fase secundaria que aporta en menor medida a la resistencia final.

APLICACIONES Y VENTAJAS DE DURABILIDAD DEL SAC

El uso del SAC presenta ventajas importantes en el desarrollo de formulaciones de cementos alternativos. Estudios señalan que, al evaluar materiales con SAC en su composición, estos muestran mayor resistencia en ambientes agresivos, principalmente frente a cloruros y sulfatos, y presentan una menor absorción de cloruros y mayor estabilidad dimensional frente a la expansión por sulfatos. Esto demuestra el potencial de este material para aplicaciones estructurales en ambientes expuestos a condiciones marinas, industriales o de ingeniería avanzada (Tan et al., 2020).

La durabilidad de las estructuras convencionales se ve severamente comprometida en estos entornos. El ataque por agentes externos en el cemento Portland convencional provoca la corrosión del refuerzo y la degradación de la matriz, lo que reduce drásticamente la vida útil de la infraestructura (figura 2). Ante este panorama, el SAC surge como una alternativa superior debido a su capacidad para mitigar estos efectos nocivos y ofrecer una protección intrínseca frente a la degradación química (figura 2).



Figura 2. Efectos nocivos del ataque por agentes agresivos (cloruros y sulfatos) en el concreto convencional.

CLASIFICACIÓN DE LAS FIBRAS Y POTENCIAL DE USO EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

La incorporación de fibras de origen vegetal en matrices cementantes no solo responde a criterios de sostenibilidad, sino que también busca mejorar propiedades críticas como la tenacidad y la resistencia a la flexión (figura 3). Al actuar como puentes que detienen la propagación de las microfisuras en la matriz del material, la falla se vuelve más dúctil y controlada (figura 3).



Figura 3. El uso de las fibras naturales en una matriz de cemento tiene potencial dentro de la industria de la construcción.

En este sentido, estudios reportados demuestran que la incorporación óptima de fibras naturales, entre 0.5 % y 2.0 % en volumen, puede incrementar la resistencia a la flexión entre un 15 % y un 30 % en comparación con matrices sin refuerzo (Adamu et al., 2022).

Las fibras se clasifican principalmente en fibras naturales (FN), derivadas de fuentes renovables, y se subdividen según su origen en minerales (como el amianto), orgánicas de origen animal (pelo o lana) y de origen vegetal. Estas últimas se clasifican según su procedencia botánica en: de cáscara (coco), de hoja (piña) y de tallo (agave) (figura 4). Por otro lado, las fibras sintéticas provienen de la polimerización, como el poliéster, mientras que las artificiales derivan de la celulosa modificada, como el rayón. En esta categoría también se integran fibras minerales, como las de vidrio o de acero; si bien estas son fundamentales, generalmente implican mayores costos económicos y energéticos en comparación con las opciones lignocelulósicas.

Las propiedades físicas y mecánicas de las fibras naturales dependen directamente de su composición química, específicamente de sus niveles de celulosa, hemicelulosa y lignina. Las tres variantes lignocelulósicas seleccionadas para esta revisión destacan por su disponibilidad regional y su

potencial para mejorar la ductilidad en matrices cementantes descarbonizadas (figura 4).



Figura 4. Caracterización visual de las fibras naturales: a) lechuguilla de agave, b) hoja de piña y c) cáscara de coco *(CC)*.

Por lo tanto, la diversidad en la disponibilidad de fibras naturales se considera de alto potencial como alternativa sostenible para el desarrollo de materiales (Benites Cerna & Paredes Novoa, 2024).

Una de las ventajas significativas al utilizar las fibras naturales es la sostenibilidad y la disminución de costos en comparación con sus contrapartes de origen sintético, ya que representan una fuente renovable y, asimismo, implican una mayor seguridad en su uso (Adamu et al., 2022).

RENDIMIENTOS Y DESAFÍOS TÉCNICOS DE LAS FIBRAS NATURALES

El uso de fibras naturales en el cemento incrementa su resistencia a la flexión y su capacidad de absorber energía antes de la ruptura del material (Imran et al., 2024).

Para fundamentar el análisis, se detallan los parámetros de composición y resistencia de cada fibra, lo que permite una comparación directa de sus capacidades de refuerzo (tabla 3).

Tabla 3. Propiedades mecánicas de distintos tipos de fibras naturales.

Fibra	Densidad (g/cm^3)	Resistencia a la Tracción (MPa)	Módulo de Elasticidad (GPa)	Ductilidad (%)	Características de la Matriz
Coco	1.10–1.40	130–250	4–6	15–30	Alta tenacidad, excelente resistencia al agua y a la degradación.
Piña	1.30–1.60	400–800	12–20	3.0–5.0	Alta rigidez y resistencia; propiedades similares a las sintéticas.
Lechuguilla	1.20–1.50	300–600	8–18	2.5–4.5	Buenas propiedades mecánicas, potencial de bajo costo y regional.

La fibra de piña presenta la mayor resistencia a la tracción y módulo de elasticidad; sin embargo, la fibra de coco presenta el mayor porcentaje de alargamiento a la rotura, mientras que la lechuguilla presenta buen potencial para su uso debido a sus buenas propiedades mecánicas, bajo costo y disponibilidad a nivel regional.

Al actuar como puentes que detienen la propagación de las microfisuras en la matriz del material, la falla será más dúctil y controlada.

En este sentido, estudios reportados (Adamu et al., 2022; Imran et al., 2024) demuestran que la incorporación óptima de fibras naturales (entre 0.5 % y 2.0 % en volumen) puede incrementar la resistencia a la flexión entre un 15 % y un 30 % en comparación con matrices sin refuerzo, además de aumentar significativamente el índice de tenacidad. Otra ventaja de su incorporación es limitar la contracción plástica, un fenómeno crítico que ocurre en la etapa temprana del curado (figura 5).

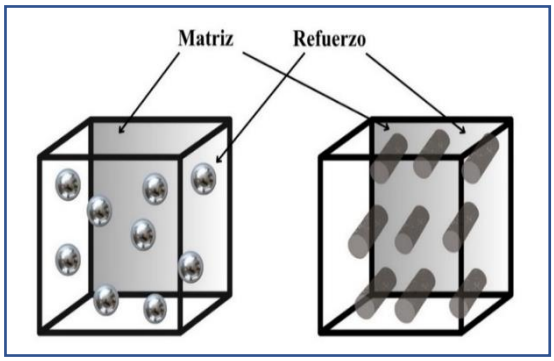
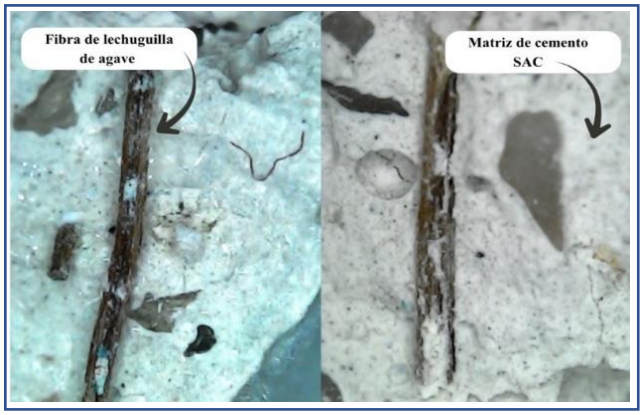


Figura 5. Representación esquemática de la adición de fibras como refuerzo en una matriz cementante.

Existen dos limitantes al trabajar fibras en cementos: la alta absorción de agua por las fibras, lo que puede provocar porosidad y debilitamiento de la matriz. La segunda es la degradación alcalina, debido a que la fibra, por su alto contenido de celulosa, puede disminuir su rendimiento con el tiempo (figura 6).



La eficiencia del refuerzo depende de la adhesión interfacial entre la fibra y la matriz de SAC. Debido a que las fibras naturales son hidrofílicas y la matriz es inorgánica, se genera una zona de transición interfacial que determina la capacidad de transferencia de esfuerzos.

El uso de recubrimientos (figura 7) no solo previene la degradación, sino que también mejora el anclaje mecánico, lo que permite que la fibra actúe como un puente efectivo que detiene la propagación de microfisuras bajo cargas de flexión (Herlina Sari et al., 2024).

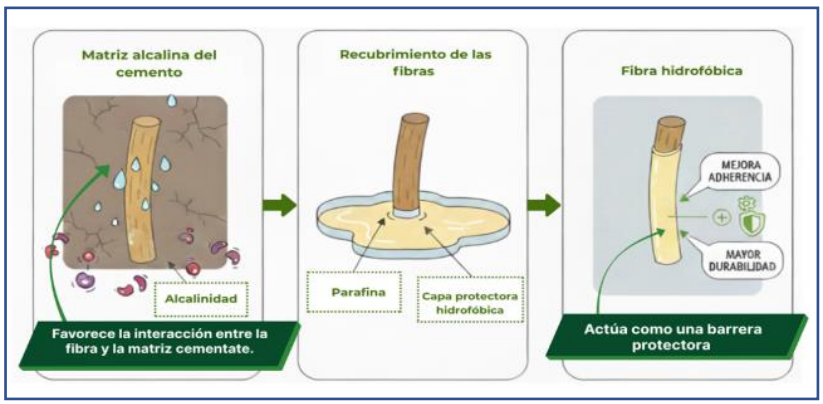


Figura 7. Mecanismo de protección de la fibra mediante recubrimiento hidrofóbico.

Las diferencias en las propiedades físicas y mecánicas de los cementos con refuerzo de fibra dependen tanto de los contenidos como del tipo de fibra empleada (Al-Zubaidi, 2018).

ECONOMÍA CIRCULAR Y FIBRAS NATURALES COMO REFUERZO EN MATRICES CEMENTICIAS

Los principios de economía circular (EC) representan un reto importante, ya que promueven la reutilización de residuos y definen las fibras como un recurso que apoya la ingeniería de materiales (figura 8). Siguiendo estos principios, se propone un diseño en el que se desarrollen materiales cementantes aptos para su uso en la industria de la construcción (Medina Leyva & Valenzuela Cayotopa, 2023).

A pesar del alto potencial técnico, la implementación industrial enfrenta barreras, como la viabilidad de las propiedades de las fibras según su origen regional y la falta de normatividad específica para el uso de SAC reforzado en aplicaciones estructurales de gran escala. Sin embargo, el análisis preliminar de ciclo de vida indica que la sustitución del CP por sistemas SAC-FN puede reducir la huella de carbono del elemento constructivo final hasta un 44 %.

La aplicación de estos compuestos en la fabricación de paneles ligeros y bloques sustentables representa una oportunidad para el sector de la vivienda de bajo costo, permitiendo sustituir los refuerzos metálicos por fibras regionales y optimizar el desempeño térmico de las edificaciones.



Figura 8. Propuesta de modelo de la economía circular en cementos SAC con refuerzo de fibras naturales.

CONCLUSIONES

Los resultados de esta revisión indican que la adición de fibras naturales mejora significativamente el desempeño mecánico del compuesto, lo que permite una transferencia de esfuerzos eficiente y un control eficaz de la propagación de fisuras. Aunque persisten desafíos técnicos relacionados con la degradación en medio alcalino, el uso de tratamientos químicos y recubrimientos optimiza la sinergia entre los biomateriales y la matriz descarbonizada.

Finalmente, la integración de residuos agroindustriales valida el potencial de estos compuestos para consolidar un modelo de economía circular en la ingeniería de materiales.

REFERENCIAS

Adamu, M., Alanazi, F., Ibrahim, Y. E., Alanazi, H., & Khed, V. C. (2022). A comprehensive review on sustainable natural fiber in cementitious composites: The date palm fiber case. *Sustainability, 14*(11), Article 6691. https://doi.org/10.3390/su14116691

Imran, A. I., Siregar, J. P., Cionita, T., Hadi, A. E., Setiyo, M., Mat Rejab, M. R., Jaafar, J., Fitriyana, D. F., & Dewi, R. (2024). Advancements in sustainable material development: A comprehensive review of coir fiber and its composites. *Mechanical Engineering for Society and Industry, 4*(3), 415–454. https://doi.org/10.31603/mesi.12556

Al-Zubaidi, A. B. (2018). Effect of natural fibers on mechanical properties of green cement mortar. AIP *Conference Proceedings,* 1968(1), 020003. https://doi.org/10.1063/1.5039162

Benites Cerna, A. E., & Paredes Novoa, A. J. (2024). *Estudio teórico del impacto de fibras naturales en la mejora de las propiedades físicas y mecánicas del concreto estructural sostenible* [Trabajo de investigación de bachillerato, Universidad Señor de Sipán]. Repositorio Institucional USS. https://hdl.handle.net/20.500.12802/13502

Bizzozero, J., Gosselin, C., & Scrivener, K. L. (2011). Dimensional stability of calcium aluminate and sulfoaluminate systems. *In Novel developments and innovation in cementitious materials* (Paper No. 27). Imperial College London.

Correa-Zeña, A., Hurtado-Bravo, A. H., & Muñoz-Pérez, S. P. (2023). Revisión sistemática de las propiedades físico-mecánicas del hormigón con incorporación de ceniza de madera. *Ingeniería y Competitividad, 25*(2), e-30111825. https://doi.org/10.25100/iyc.v25i2.11825

Gallardo H., M., Almanza R., J. M., Cortés H., D. A., & Escobedo B., J. C. (2016). Comportamiento mecánico y químico de cementos de sulfoaluminato de calcio obtenido a partir de desechos industriales. *Revista ALCONPAT, 6*(1), 15–27. https://doi.org/10.21041/ra.v6i1.112

Herlina Sari, N., Suteja, Sutaryono, Y. A., & Khan, M. A. (2024). A review: Fracture structure of natural fiber surface after treatment with various alkali chemicals. *Journal of Fibers and Polymer Composites, 3*(2), 158–180. https://doi.org/10.55043/jfpc.v3i2.203

Lertwattanaruk, P., & Suntijitto, A. (2015). Properties of natural fiber cement materials containing coconut coir and oil palm fibers for residential building applications. *Construction and Building Materials, 94*, 664–669. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.154

Li, H., Meng, J., Liu, Y., Yang, L., Wang, Y., Xie, N., Ou, J., & Zhou, G. (2025). A review of the calcium sulphoaluminate cement mixed with seawater: Hydration process, microstructure, and durability. *Journal of Marine Science and Engineering, 13*(6), Article 1076. https://doi.org/10.3390/jmse13061076

Medina Leyva, K. G., & Valenzuela Cayotopa, J. A. (2023). *Propiedades y patologías del concreto con fibras de coco y cenizas de hoja de piña en Ate - 2023* [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional UCV. https://hdl.handle.net/20.500.12692/137086

Navarro Ferrer, F. (2022). *Cementos alternativos al cemento Portland* [Trabajo de fin de máster, Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea]. ADDI Repositorio Institucional. https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/61001/TFM_NavarroFrancisco.pdf?sequence=4

Negrão, L. B. A. (2022). *Production of CO2-reduced eco-cements using bauxite-mining overburden Belterra Clay and bauxite washing residue from Brazilian Amazon* [Tesis doctoral, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg]. https://opendata.uni-halle.de/handle/1981185920/80419

Tan, B., Okoronkwo, M. U., Kumar, A., & Ma, H. (2020). Durability of calcium sulfoaluminate cement concrete. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 21*(2), 118–128. https://doi.org/10.1631/jzus.A1900588

Tanguler-Bayramtan, M., Aktas, C. B., & Yaman, I. O. (2024). Environmental assessment of calcium sulfoaluminate cement: A Monte Carlo simulation in an industrial symbiosis framework. *Buildings, 14*(11), Article 3673. https://doi.org/10.3390/buildings14113673

Wu, S., Ren, C., Sun, Y., & Wang, W. (2024). Synthesis, structure, and hydration of stoichiometric ye'elimite and iron-bearing ye'elimite. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 13*(1), 164–177. https://doi.org/10.1080/21650373.2023.2258500

REVISIÓN

TECNOLOGÍA ULTRASÓNICA PARA INCREMENTAR LA EFICIENCIA EN LA RECUPERACIÓN DE MINERALES: SÍNTESIS DE AVANCES RECIENTES

ULTRASONIC TECHNOLOGY TO INCREASE MINERAL RECOVERY EFFICIENCY: A SYNTHESIS OF RECENT ADVANCES

MORONES SILLAS, Jesús Alberto[1]

LÓPEZ SAUCEDO, Felipe De Jesús[2]

CARRILLO PEDROZA, Francisco Raúl[1]

RESUMEN

La tecnología ultrasónica ha emergido como una herramienta de intensificación con potencial para mejorar la eficiencia en el procesamiento de minerales, particularmente en procesos de concentración como la flotación por espuma. El ultrasonido induce efectos fisicoquímicos (cavitación acústica, flujo acústico, generación de microburbujas y modificación de reactivos) que permiten limpiar superficies minerales, mejorar la dispersión de reactivos y optimizar la interacción partícula-burbuja. Esta revisión sistemática sintetiza los avances científicos publicados entre 2017 y 2025 sobre la aplicación de esta tecnología en la recuperación de mineral Chen et al., 2024). es. Se analizan los fundamentos fisicoquímicos, los parámetros operativos críticos y las principales aplicaciones reportadas en distintos tipos de minerales y residuos complejos. Los hallazgos indican que el ultrasonido ofrece mejoras documentadas en recuperación y ley de concentrados, con beneficios adicionales en la reducción del consumo de reactivos y en la sostenibilidad ambiental del procesamiento. Se concluye que constituye una alternativa viable para la modernización de la industria minera, aunque su implementación a escala industrial requiere un control riguroso de los parámetros operativos y estudios adicionales de escalamiento.

Palabras clave: tecnología ultrasónica; procesamiento de minerales; cavitación acústica; flotación por espuma; intensificación de procesos.

1. Facultad de Metalurgia, Universidad Autónoma de Coahuila. Monclova, Coahuila, México.

2. Escuela Superior de Ingeniería "Lic. Adolfo López Mateos", Universidad Autónoma de Coahuila. Nueva Rosita, Coahuila, México.

ABSTRACT

Ultrasonic technology has emerged as an intensification tool with the potential to improve efficiency in mineral processing, particularly in concentration

Correspondencia:
moronesj@uadec.edu.mx
https://orcid.org/0009-0004-1996-3859

Fecha de recepción
2 de diciembre de 2025.
Fecha de aceptación
7 de junio de 2026.

processes such as froth flotation. Ultrasound induces physicochemical effects (acoustic cavitation, acoustic streaming, microbubble generation, and reagent modification) that enable the cleaning of mineral surfaces, the improvement of reagent dispersion, and the optimization of particle-bubble interaction. This systematic review synthesizes scientific advances published between 2017 and 2025 on the application of this technology in mineral recovery. The physicochemical fundamentals, critical operating parameters, and main applications reported in different types of ores and complex residues are analyzed. The findings indicate that ultrasound offers documented improvements in recovery and concentrate grade, with additional benefits in reducing reagent consumption and in the environmental sustainability of processing. It is concluded that it constitutes a viable alternative for the modernization of the mining industry, although its implementation at an industrial scale requires rigorous control of operating parameters and further scaling studies.

Keywords: *ultrasonic technology; mineral processing; froth flotation; acoustic cavitation; process intensification.*

INTRODUCCIÓN

La industria minera enfrenta desafíos continuos para mejorar la eficiencia en la recuperación de minerales valiosos, al tiempo que reduce el impacto ambiental y los costos operativos. En este contexto, la tecnología ultrasónica ha emergido como una herramienta prometedora para incrementar la eficiencia de los procesos de separación mineral, en particular en la flotación por espuma (X. Zhang et al., 2024). El ultrasonido, definido como ondas sonoras con frecuencias superiores a 20 kHz, genera efectos físicos únicos cuando se aplica a sistemas líquidos, entre ellos la cavitación acústica, el flujo acústico y los efectos térmicos localizados (Yin et al., 2024).

La aplicación del ultrasonido en el procesamiento de minerales se basa en varios mecanismos que pueden mejorar significativamente la eficiencia de la separación. La cavitación acústica es el fenómeno más relevante y consiste en la formación, el crecimiento y el colapso violento de microburbujas en el medio líquido debido a las variaciones de presión generadas por las ondas ultrasónicas (Chen et al., 2024). Este proceso genera fuerzas mecánicas intensas, temperaturas y presiones localmente elevadas, así como radicales

libres, todos los cuales pueden modificar las propiedades superficiales de los minerales y mejorar la interacción partícula-burbuja en la flotación (Jiang et al., 2024).

Por tanto, el objetivo de esta revisión es sintetizar los avances recientes (2017–2025) en la aplicación de la tecnología ultrasónica para el procesamiento de minerales, con énfasis en la flotación por espuma. Se analizan los mecanismos fisicoquímicos involucrados, los parámetros operativos óptimos y las aplicaciones reportadas en diversas matrices minerales, con el fin de evaluar la viabilidad de esta tecnología como alternativa para la modernización sostenible de la industria minera.

1.1 EVOLUCIÓN DE LA TECNOLOGÍA ULTRASÓNICA

En la figura 1 se muestran las etapas históricas de la evolución de la tecnología ultrasónica en el procesamiento de minerales.

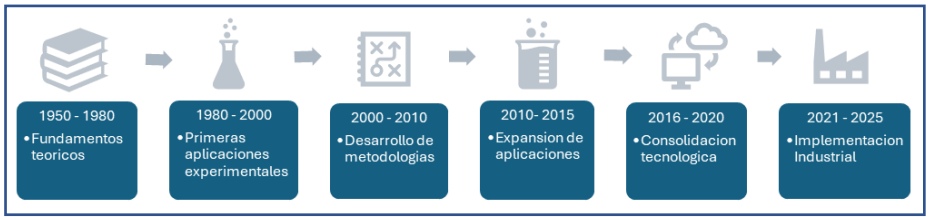


Figura 1. *Etapas de la evolución de la tecnología ultrasónica. Elaboración propia.*

El desarrollo de la tecnología ultrasónica aplicada a procesos industriales y mineros se dio entre las décadas de 1950 y 1980. Durante este período, los estudios pioneros de Plesset (1949) y Noltingk y Neppiras (1950) establecieron los fundamentos de la dinámica de burbujas de cavitación y sus efectos mecánicos en líquidos; Jaffe et al. (1954) desarrollaron los transductores piezoeléctricos de zirconato-titanato de plomo que permitieron la generación controlada de ultrasonido de alta potencia; y diversos investigadores iniciaron las primeras aplicaciones industriales del ultrasonido en procesamiento químico y detección no destructiva de fallas. Posteriormente, entre 1980 y 2000, la atención se dirigió al sector minero, donde Celik (1989) realizó los primeros estudios sobre el efecto del ultrasonido en la flotación de galena y carbón, Djendova y Mehandjiski (1992) investigaron el acondicionamiento acústico de colectores y espumantes en menas sulfuradas, y Aldrich y Feng (1999) evaluaron el preacondicionamiento ultrasónico de pulpas de sulfuros. Durante este período también se desarrollaron los primeros modelos matemáticos de cavitación en pulpas minerales. Ya para el intervalo de 2000

a 2010 se logró una caracterización sistemática de los parámetros ultrasónicos en flotación (Ozkan y Kuyumcu, 2006), junto con los primeros diseños de equipos ultrasónicos específicos para aplicaciones mineras (Ozkan y Kuyumcu, 2007).

Durante el período comprendido entre 2010 y 2015, estos avances se tradujeron en aplicaciones exitosas en minerales no metálicos, óxidos de hierro y menas sulfuradas complejas, así como en el desarrollo de celdas de flotación equipadas con transductores ultrasónicos para el tratamiento simultáneo de pulpas (Cilek & Ozgen, 2010; Donskol et al., 2012; Gurpinar et al., 2013; Ozkan, 2012). En este lapso, Cilek y Ozgen (2009) demostraron que el ultrasonido mejora significativamente la selectividad de separación en celdas mecánicas, aplicándolo a sistemas barita-calcopirita; Donskol et al. (2012) emplearon el tratamiento ultrasónico en beneficio de finos de hematita/goethita, logrando una reducción del contenido de sílice; Gurpinar et al. (2004) evaluaron el efecto del preacondicionamiento ultrasónico en la flotación de calcita, barita y cuarzo, estableciendo las condiciones óptimas de potencia y tiempo para cada matriz; y Ozkan (2012) diseñó celdas de flotación equipadas con baños ultrasónicos para el tratamiento simultáneo de lodos de carbón, documentando mejoras en la recuperación de materia combustible. Luego, entre 2016 y 2017, se profundizó en el ámbito experimental con modelos de generación de microburbujas y de comportamiento termodinámico de la cavitación orientados a la flotación (Mao et al., 2019; Zhou et al., 2009).

De 2018 a 2020, la investigación se amplió a estudios aplicados en petróleo, aceites y residuos, y se iniciaron las primeras evaluaciones del uso simultáneo del ultrasonido en las etapas de flotación primaria y de limpieza en procesos de cobre y otros minerales (Altun et al., 2009; Hassanzadeh et al., 2020; Videla et al., 2016). En los años siguientes, de 2021 a 2024, se observó un incremento notable de trabajos piloto y de campo, con aplicaciones en reciclaje de residuos de placas de circuito impreso (WPCBs), intensificación en potasa y validaciones cuantitativas que demostraron mejoras en liberación y recuperaciones aumentadas (X. Zhang et al., 2024; Zhou et al., 2025). Finalmente, entre 2024 y 2025, la madurez del campo quedó reflejada en revisiones sistemáticas que sintetizan los parámetros operativos y mecanismos, acompañadas de demostraciones concretas de viabilidad comercial (H. Zhang et al., 2024; Yin et al., 2024).

1.2 MECANISMOS FISICOQUÍMICOS

Comprender los fenómenos fisicoquímicos inducidos por el ultrasonido resulta fundamental para interpretar de manera rigurosa los efectos observados en la flotación de minerales y, en consecuencia, para establecer las condiciones operativas que maximicen la recuperación. Dado que parte del objetivo de esta revisión es analizar los fundamentos fisicoquímicos que sustentan la efectividad del ultrasonido en el procesamiento de minerales, resulta imperativo describir en detalle los mecanismos interrelacionados mediante los cuales las ondas de alta frecuencia modifican el comportamiento de la pulpa y de las superficies minerales. Estos mecanismos no operan de forma aislada, sino que actúan sinérgicamente durante el tratamiento acústico, condicionando variables críticas como la hidrofobicidad de las partículas, la distribución de reactivos y la eficiencia de la adhesión partícula-burbuja. A continuación, se describen los cuatro mecanismos principales que fundamentan la intensificación ultrasónica en la flotación por espuma.

1.2.1 Cavitación acústica

Es el fenómeno más relevante y consiste en la formación, crecimiento y colapso violento de microburbujas o cavidades en el seno del líquido, originado por los ciclos de compresión y rarefacción de las ondas ultrasónicas. Durante el colapso, se generan condiciones extremas localizadas: presiones de hasta 1000 atm y temperaturas de varios miles de grados Celsius, en escalas de microsegundos, que producen ondas de choque intensas y microchorros hidrodinámicos. Estos efectos mecánicos son capaces de fragmentar agregados minerales, disgregar partículas adheridas y remover capas de óxidos, silicatos u otras impurezas que recubren la superficie del mineral, exponiendo así sitios activos frescos para la interacción con los colectores. Adicionalmente, la cavitación induce la formación de radicales libres (por ejemplo, ·OH y ·H a partir de la homólisis del agua), los cuales pueden modificar la química de superficie y el potencial zeta de las partículas, favoreciendo o inhibiendo selectivamente la adsorción de reactivos según el sistema mineral (Chen et al., 2024). En la figura 2 se ilustra esquemáticamente la creación y el colapso implosivo de estas cavidades, lo que genera presiones locales capaces de alterar la morfología superficial de las partículas.

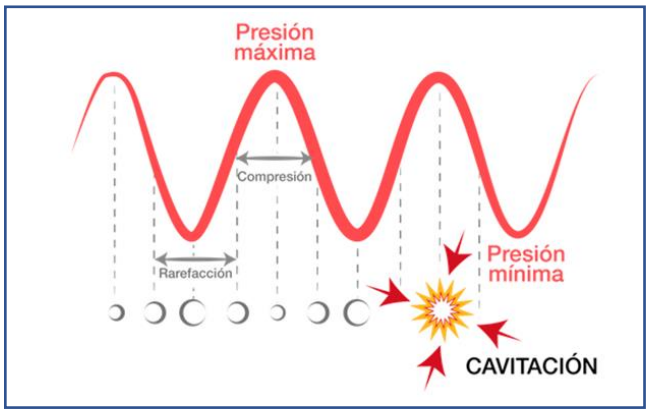


Figura 2. Cavitación ultrasónica.
Adaptada de H. Zhang et al. (2024).

1.2.2 Generación de microburbujas

El campo acústico sostenido produce poblaciones estables de microburbujas con diámetros entre 1 y 100 µm, significativamente menores que los de las burbujas convencionales generadas por sistemas de aireación mecánica. La reducción del tamaño de las burbujas conlleva un aumento considerable de la superficie interfacial gas-líquido disponible para el transporte de partículas hidrofóbicas hacia el espumadero. Asimismo, las microburbujas ultrasónicas exhiben un mayor tiempo de residencia en la pulpa, una menor velocidad de ascenso y una distribución más homogénea en el volumen de flotación, lo que incrementa la probabilidad de colisiones eficientes con partículas de grano fino y ultrafino (fracciones que, de otro modo, serían difíciles de recuperar mediante flotación convencional). La estabilidad de estas microburbujas depende de la frecuencia y la potencia aplicadas, lo que constituye uno de los parámetros operativos críticos que determinan el desempeño del proceso (Jiang et al., 2024).

1.2.3 Flujo acústico

Las ondas ultrasónicas generan corrientes estacionarias de largo alcance, conocidas como flujo acústico, que inducen una microconvección intensa en la pulpa. Este fenómeno mejora sustancialmente la mezcla del sistema, reduce el espesor de las capas límite hidrodinámicas que rodean tanto a las partículas minerales como a las burbujas, y promueve el contacto efectivo entre ambas fases. Al disminuir las resistencias hidrodinámicas, el flujo acústico facilita las etapas de aproximación, colisión y adhesión partícula-burbuja, lo que

incrementa la eficiencia global de la colección. Este mecanismo resulta particularmente relevante en pulpas de alta densidad o en sistemas con partículas de alta masa específica, donde la agitación mecánica convencional es insuficiente para mantener una suspensión homogénea sin generar turbulencias destructivas que rompan agregados ya formados (Chen et al., 2022).

1.2.4 Modificación de reactivos

El ultrasonido ejerce efectos directos sobre la fase líquida reactiva y mejora la eficiencia de los colectores, espumantes y modificadores. En el caso de colectores oleosos insolubles o de baja solubilidad, como el queroseno, el aceite de pino o los ácidos grasos, la cavitación acústica promueve su emulsificación, reduciendo el tamaño de las gotas a valores de entre 1 y 2 µm y aumentando la superficie de contacto disponible para la adsorción sobre el mineral. Asimismo, el tratamiento ultrasónico puede reducir el tamaño de partícula de reactivos sólidos (como activadores o depresores), acelerar la disolución de sales y, en algunos casos, inducir reacciones químicas que generan especies más activas o selectivas. La consecuencia directa es la reducción de la dosis requerida de reactivos, documentada en hasta un 40 % en algunos sistemas, junto con el mejoramiento de la selectividad de separación entre minerales de valor y ganga (Gungoren et al., 2017).

En conjunto, estos cuatro mecanismos configuran un marco de intensificación multifactorial: la cavitación limpia y activa las superficies, las microburbujas aumentan la eficiencia de transporte, el flujo acústico optimiza la hidrodinámica de contacto, y la modificación de reactivos reduce costos y mejora la selectividad. Comprender su interacción sinérgica resulta indispensable para interpretar los resultados experimentales revisados en la sección de desarrollo y discusión, así como para justificar la selección de los parámetros operativos —frecuencia, potencia, tiempo y configuración del equipo— que se examinan en ese apartado.

METODOLOGÍA

El presente trabajo corresponde a una revisión sistemática de la literatura científica (Snyder, 2019), orientada a sintetizar, analizar y evaluar críticamente los avances experimentales publicados entre 2017 y 2025 sobre la aplicación de la tecnología ultrasónica en la recuperación de minerales mediante

flotación. La estrategia metodológica se estructuró en cuatro fases secuenciales: (i) formulación de la pregunta de investigación y definición de criterios de elegibilidad; (ii) búsqueda y selección de la información; (iii) extracción y clasificación de datos; y (iv) síntesis crítica y evaluación de la calidad de la evidencia.

2.1 CRITERIOS DE ELEGIBILIDAD Y SELECCIÓN

Para garantizar la reproducibilidad y la rigurosidad del proceso, se establecieron criterios de inclusión y exclusión explícitos antes de iniciar la búsqueda. Los criterios de inclusión fueron: (a) artículos originales y revisiones publicados en revistas científicas indexadas con arbitraje por pares; (b) estudios que reportaran datos experimentales cuantitativos sobre la recuperación de minerales, la ley de concentrados o el consumo de reactivos con y sin tratamiento ultrasónico; (c) publicaciones en inglés o español; (d) disponibilidad del texto completo; y (e) periodo de publicación comprendido entre 2017 y 2025. Los criterios de exclusión fueron: (i) trabajos no arbitrados, tesis de grado o posgrado, resúmenes de congresos sin texto completo, capítulos de libro y patentes; (ii) estudios centrados exclusivamente en aplicaciones biomédicas, de limpieza de superficies o de síntesis de materiales sin relación directa con la flotación mineral; (iii) artículos cuyos datos experimentales no permitieran discriminar el efecto específico del ultrasonido del resto de variables operativas; y (iv) publicaciones duplicadas o con datos redundantes reportados en estudios previos del mismo grupo de investigación.

2.2 ESTRATEGIA DE BÚSQUEDA Y FLUJO DE SELECCIÓN

Se consultaron las bases de datos especializadas ScienceDirect, Scopus, Web of Science, mdpi Journals, IOPscience y Google Scholar. Se empleó una combinación de términos clave en inglés y español agrupados en cuatro dimensiones: tecnología (*ultrasonic technology*, tecnología ultrasónica), proceso (*mineral flotation,* flotación de minerales), mecanismo (*acoustic cavitation*, cavitación acústica, *microbubbles*) e indicador de desempeño (*mineral recovery*, recuperación de minerales). La búsqueda se complementó con la revisión de las listas de referencias de los artículos incluidos (*snowballing*) para identificar estudios adicionales.

El proceso de selección se documentó siguiendo un esquema tipo PRISMA (Page et al., 2021). Inicialmente se identificaron registros en las bases de datos

consultadas. Tras eliminar duplicados, se realizó un tamizaje de títulos y resúmenes, excluyendo los registros que no cumplían los criterios de elegibilidad temática. Los artículos restantes se sometieron a lectura del texto completo, de los cuales se excluyeron los que carecían de datos cuantitativos comparativos de recuperación con y sin ultrasonido, los que no especificaban parámetros operativos del equipo ultrasónico, y los que correspondían a aplicaciones fuera del ámbito de la flotación mineral. Finalmente, el corpus de análisis quedó conformado por 24 artículos de revistas arbitradas, publicados entre 2017 y 2025.

2.3 EXTRACCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE DATOS

Una vez seleccionados los 24 artículos, se realizó una lectura crítica orientada a extraer la información necesaria para responder cada uno de los propósitos de la revisión. Los datos se organizaron en tres matrices analíticas: (a) Mecanismos, donde se registraron las evidencias reportadas sobre cavitación acústica, flujo acústico, generación de microburbujas y modificación de reactivos, así como su interacción sinérgica; (b) Parámetros operativos, donde se sistematizaron los rangos de frecuencia, potencia, tiempo y configuración de equipo asociados a las mayores recuperaciones documentadas; y (c) Matrices minerales, donde se clasificaron las aplicaciones según el tipo de mineral o residuo procesado (sulfuros, óxidos, materiales de desecho, etc.) y las condiciones particulares de cada sistema. De cada estudio se extrajeron, además, los resultados cuantitativos de recuperación y de ley, junto con las comparaciones con procesos convencionales sin ultrasonido.

De los 24 artículos incluidos en el corpus, doce fueron seleccionados para análisis detallado en la sección de Desarrollo y Discusión, dado que presentaban datos experimentales cuantitativos comparativos (recuperación, ley o consumo de reactivos con y sin tratamiento ultrasónico) que permitieron evaluar de manera cruzada la efectividad de la tecnología. Los artículos restantes se emplearon como soporte contextual en las secciones de Introducción, Mecanismos Fisicoquímicos y Conclusiones.

2.4 SÍNTESIS Y EVALUACIÓN CRÍTICA

La información extraída se integró mediante un análisis temático que permitió identificar patrones, tendencias y vacíos en la literatura. Los hallazgos se agruparon por tipo de mineral, mecanismo predominante y rango de parámetros óptimos, lo que permitió evaluar de manera cruzada la

reproducibilidad de los resultados y las condiciones en las que la tecnología ultrasónica demuestra mayor efectividad. Finalmente, se elaboró una narrativa crítica que discute el estado actual de la tecnología, sus beneficios documentados en términos de recuperación y sostenibilidad, y los desafíos técnicos y de escalamiento que aún limitan su implementación industrial.

DESARROLLO Y DISCUSIÓN

La integración de la tecnología ultrasónica en el procesamiento de minerales representa un avance significativo para superar las limitaciones e ineficiencias de la flotación convencional. Fundamentalmente, la aplicación de esta energía modifica la fisicoquímica del sistema mediante la cavitación y las fuerzas de radiación acústica, fenómenos que actúan de manera sinérgica para limpiar las superficies de las partículas, aumentar los sitios activos y optimizar la dispersión de los reactivos en la pulpa. A partir de estos principios operativos, diversas investigaciones recientes han evaluado y cuantificado el impacto de estas ondas en una amplia variedad de matrices minerales, lo que ha consolidado su viabilidad industrial.

X. Zhang et al. (2024) analizaron la flotación mineral mejorada por ultrasonido en una amplia gama de materias primas, que incluyen carbón, cuarzo, galena y materiales de desecho, destacando que su eficacia se fundamenta en la generación de ondas ultrasónicas y en los efectos de la cavitación y las fuerzas de radiación acústica. Estos autores señalan que esta tecnología limpia las superficies minerales de impurezas, aumenta los sitios activos y optimiza la dispersión de los reactivos químicos. En concordancia con este mecanismo de limpieza superficial, Yin et al. (2023) demostraron en su estudio sobre cuarzo y siderita de grano fino que la cavitación ultrasónica aplicada a 200 W durante 0.5 minutos logra eliminar eficazmente el recubrimiento no selectivo de partículas finas de siderita y precipitados de CaCO3. Según sus cálculos y análisis de superficie, esta acción mecánica directa incrementa los sitios activos disponibles para la activación, elevando la recuperación de cuarzo de un 38.79 % en condiciones convencionales (sin ultrasonido) a un 58.38 % con el tratamiento ultrasónico, lo que representa un incremento de aproximadamente 19.6 % atribuible exclusivamente al efecto de la cavitación acústica.

Además de los cambios morfológicos en la fase sólida, la eficiencia de los reactivos colectores se ve potenciada de manera drástica por la energía acústica. Jiang et al. (2024) investigaron este fenómeno en la flotación del grafito de escamas mediante la preparación de una emulsión de queroseno modificada con un disruptor de ultrasonido a 300 W durante tres minutos. Sus resultados destacan que el tratamiento fragmenta el queroseno en microgotas de entre 1 a 2 µm, mejorando su dispersión y estabilidad en la solución acuosa. Esta optimización permitió una interacción más efectiva con la superficie del mineral, logrando un 90 % de recuperación con una dosificación de solo 6 mg/L de queroseno modificado, lo que representa una reducción del 40 % en su consumo frente a los 10 mg/L requeridos sin el tratamiento acústico.

La versatilidad de estos mecanismos resulta fundamental al abordar matrices minerales complejas y procesos de reciclaje. Chen et al. (2024) introdujeron un pretratamiento ultrasónico en el procesamiento de un residuo ultrafino de lixiviación oxidativa de sulfuro de zinc, logrando aumentar significativamente la liberación completa del azufre elemental en un 20.91 % y de la plumbojarosita en un 38.53 %. Al ampliar las diferencias superficiales entre ambas fases, los autores lograron mejorar sustancialmente la separación por flotación, incrementando la ley y recuperación de azufre en el concentrado en 11.63 % y 9.10 %, y elevando en un 8.72 % y un 9.50 %, respectivamente, las recuperaciones de plomo y plata en los relaves, respectivamente. De manera paralela, en el ámbito del reciclaje electrónico, Chen et al. (2023) abordaron la recuperación de metales a partir de residuos de placas de circuito impreso (WPCB) mediante un proceso de flotación inversa asistido por ultrasonido. Su metodología demostró que el ultrasonido promueve la eliminación de resinas epóxicas adheridas a las fibras de vidrio, reduce la aglomeración de partículas y aumenta la hidrofobicidad de los componentes no metálicos. Como resultado, los investigadores lograron un incremento del 7.20 % en la recuperación total de metales, destacando mejoras específicas del 4.82 % en cobre, 15.41 % en aluminio y 5.58 % en zinc, lo que evidencia que esta técnica es una ruta ambientalmente sostenible para el reciclaje de WPCB.

Finalmente, la eficiencia global del proceso depende intrínsecamente del diseño experimental, de la configuración del equipo y del control de las frecuencias emitidas. En las configuraciones de laboratorio, el uso de ondas ultrasónicas a 42 kHz constituye una especificación operativa altamente eficaz para garantizar una dispersión inicial adecuada y una cavitación estable en las celdas de prueba. Zhou et al. (2023) profundizaron en estas variables al

comparar el uso de ultrasonidos de tipo bocina (20 kHz) y de tipo baño (40 kHz) durante el preacondicionamiento de pulpa de concentrado de grafito en escamas. Los autores revelaron que el ultrasonido de tipo bocina es significativamente más eficaz, logrando un aumento del 7 % en la recuperación de carbono al facilitar la liberación de ganga incrustada, mientras que el equipo de baño solo alcanzó un incremento del 2 %. En conjunto, la literatura consolida a esta tecnología como una alternativa más eficiente y sostenible que los métodos convencionales, capaz de incrementar la tasa de recuperación de concentrado en aproximadamente un 10 %, aunque Zhou et al. (2025) advierten que un tratamiento excesivamente prolongado puede provocar una fragmentación perjudicial de las partículas, lo que afecta negativamente la flotación.

3.1 Dependencia del sistema mineral en la flotación por espuma

La efectividad del tratamiento ultrasónico como intensificador de la flotación no es universal; depende de manera decisiva de las características intrínsecas del sistema mineral a procesar. La interacción entre las ondas acústicas y la matriz sólido-líquido varía según la naturaleza química de las superficies, la distribución granulométrica y la complejidad textural del mineral, lo que exige una caracterización previa para predecir la respuesta al tratamiento en el circuito de flotación.

3.1.1 Mineralogía y susceptibilidad superficial

Los minerales con superficies más susceptibles a modificación físico-química (particularmente los sulfuros metálicos) muestran una respuesta significativamente mayor en flotación que los minerales refractarios o silicatados. Esto se debe a que la cavitación acústica genera sitios activos y frescos en superficies sulfhídricas, lo que facilita la adsorción selectiva de colectores de tipo xantato o ditiofosfato. En contraste, minerales oxidados como el cuarzo o la siderita requieren condiciones de flotación más específicas, en las que el ultrasonido actúa principalmente para eliminar recubrimientos no selectivos de óxidos o precipitados de carbonato cálcico que inhiben la adsorción de activadores. Los estudios sobre sistemas carbonosos han demostrado que el tratamiento ultrasónico reduce el contenido de funcionalidades oxigenadas hidrofílicas en la superficie del carbón, mejorando su hidrofobicidad y, por ende, su flotabilidad (Barma et al., 2019), lo que confirma que el beneficio del tratamiento está condicionado por la

química superficial específica de cada fase mineral y no por un efecto genérico indiscriminado.

3.1.2 Granulometría y eficiencia de captación

Las partículas del rango de 10 a 100 µm muestran la mejor respuesta al tratamiento ultrasónico en cuanto a recuperación por flotación. Por debajo de 10 µm, las fracciones ultrafinas tienden a formar agregados por fuerzas de van der Waals o a adherirse de manera ineficiente a burbujas convencionales debido a la baja energía cinética de colisión. El ultrasonido mejora la dispersión de estas fracciones y genera microburbujas de 1 a 100 µm que incrementan la probabilidad de adhesión selectiva. Por encima de 100 µm, el efecto del ultrasonido se reduce porque las fuerzas de inercia de las partículas gruesas dificultan su transporte por el flujo acústico, y la cavitación puede resultar insuficiente para modificar la química de la superficie en volúmenes mayores. En el caso particular del grafito fino, se ha comprobado que la ultrasonificación promueve la formación de nanoburbujas de cavidad que actúan como puentes de transporte para partículas de pequeño diámetro, lo que incrementa la recuperación de fracciones que de otro modo se perderían en los relaves (Li et al., 2020). Esta dependencia granulométrica explica por qué la tecnología ha mostrado resultados particularmente favorables en el procesamiento de minerales de grafito en escamas y en relaves ultrafinos, donde la fracción fina constituye el principal desafío de la flotación convencional.

3.1.3 Asociaciones minerales y liberación

Los minerales con asociaciones complejas, inclusiones finas o texturas intercrecidas muestran los mayores beneficios en cuanto a liberación y selectividad de flotación. En estos sistemas, el ultrasonido actúa como agente de desagregación mecánica que fractura las uniones entre fases mineralógicas sin necesidad de molienda adicional, aumentando el grado de liberación y, en consecuencia, la eficiencia de la separación por flotación (Chen et al., 2024). Los residuos de lixiviación oxidativa y los materiales de desecho electrónico son ejemplos representativos en los que el pretratamiento ultrasónico amplía las diferencias superficiales entre fases valiosas y ganga, lo que mejora la separación selectiva (Zhou et al., 2023). Sin embargo, esta misma capacidad fragmentaria implica un riesgo operativo: tratamientos excesivamente prolongados pueden generar finos contraproducentes que disminuyen la recuperación al aumentar la carga de sólidos en la espuma o

promover la flotación mecánica no selectiva de ganga, lo que evidencia la necesidad de ajustar el tiempo de exposición acústica a la fragilidad de la matriz mineral específica.

3.2 OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS OPERATIVOS EN FLOTACIÓN ASISTIDA POR ULTRASONIDO

La transferencia de la tecnología ultrasónica desde el laboratorio hacia aplicaciones industriales de flotación exige un control riguroso de los parámetros operativos. La literatura revisada permite establecer ventanas óptimas para cada variable, aunque su ajuste final debe responder a las características específicas de la matriz mineral y a la etapa del circuito de flotación donde se aplica el ultrasonido, ya sea en pretratamiento, acondicionamiento de pulpa o flotación propiamente dicha.

3.2.1 Tiempo de tratamiento

Los tiempos óptimos reportados en flotación asistida por ultrasonido varían de 0.5 a 5 minutos, siendo de dos a tres minutos el rango más efectivo para la mayoría de las aplicaciones de flotación. Periodos inferiores a un minuto resultan insuficientes para inducir una cavitación estable y una limpieza superficial completa, lo que limita el efecto activador del ultrasonido. Por el contrario, tratamientos prolongados por encima de cinco minutos pueden inducir una fragmentación excesiva de las partículas, aumentar la entropía del sistema y generar finos que compiten por la superficie de las burbujas, lo que reduce la selectividad del proceso. Los ensayos sistemáticos sobre la flotación de cuarzo han establecido que, bajo condiciones de pH neutro y potencias de 120 a 300 W, la exposición acústica de diez a quince minutos maximiza la remoción de impurezas superficiales, mientras que tiempos mayores de veinte minutos no aportan beneficios adicionales e incluso pueden degradar la selectividad del proceso (Deng et al., 2024). Por tanto, el tiempo de tratamiento debe calibrarse como una función inversa de la fragilidad del mineral y de la distribución granulométrica inicial de la pulpa.

3.2.2 Potencia ultrasónica

Potencias de 100 a 300 W han demostrado ser efectivas en volúmenes de laboratorio en ensayos de flotación, con escalado proporcional para aplicaciones industriales. A potencias inferiores a 100 W, la intensidad

acústica es insuficiente para generar cavitación en pulpas minerales de alta densidad, cuyas tensiones superficiales y contenidos de sólidos amortiguan la propagación de las ondas. Por encima de 300 W, el efecto térmico localizado puede alterar la química de los reactivos, especialmente los espumantes de tipo poliglicólico, o inducir la precipitación de sales que modifican el pH de la pulpa. En flotación de carbón, se ha documentado que niveles de 30 a 60 W/L durante el acondicionamiento simultáneo reducen la dosis óptima de reactivos colectores de 120 a 125 g/t a 95 a 100 g/t, alcanzando recuperaciones de combustibles superiores al 90 % con menor consumo químico (Ozkan, 2017). Estos hallazgos delimitan una ventana segura entre la ineficiencia por baja energía y el daño por sobrepotencia.

3.2.3 Frecuencia y configuración del equipo

Las frecuencias de 20 a 40 kHz han mostrado los mejores resultados en flotación por espuma, ya que en este rango se maximiza la generación de microburbujas estables y la cavitación en las pulpas minerales. Frecuencias más bajas (20 kHz), típicas de equipos tipo bocina, generan cavitación más intensa y son particularmente eficaces para la limpieza de superficies minerales pesadas y la liberación de ganga incrustada, lo que se traduce en mayores incrementos de la recuperación de carbono en sistemas de grafito. Frecuencias más altas (40 a 80 kHz), propias de los baños ultrasónicos, producen una cavitación más suave y homogénea, orientada preferentemente a la limpieza superficial previa a la flotación y a la dispersión de reactivos, aunque con menor impacto en la generación de microburbujas de arrastre. Investigaciones comparativas en flotación de carbón han revelado que la frecuencia de 37 kHz genera mayor recuperación combustible que la de 80 kHz, debido a la mayor estabilidad de las microburbujas de cavitación generadas a longitudes de onda más largas, aunque el efecto varía según la fracción granulométrica: el incremento en la recuperación supera el 35 % en partículas gruesas, el 40 % en fracciones medias y el 25 % en finas (Ebrahimi & Karamoozian, 2020). La elección entre bocina y baño no es trivial: mientras la bocina concentra la energía en una zona focalizada, útil para el preacondicionamiento de pulpa, el baño distribuye la energía de manera más uniforme, lo que resulta preferible para el tratamiento de pequeños volúmenes de muestra o la preparación de emulsiones de colectores.

En conjunto, la optimización de estos parámetros requiere un enfoque sistémico en el que la frecuencia, la potencia y el tiempo se ajusten de manera coordinada según la mineralogía, la granulometría y el objetivo de la etapa

de flotación. Los patrones identificados en la literatura revisada sugieren que no existe una configuración universal óptima, sino que la eficiencia del proceso depende de la combinación específica que maximice la sinergia entre los cuatro mecanismos fisicoquímicos descritos anteriormente.

CONCLUSIONES

La revisión sistemática de la literatura científica publicada entre 2017 y 2025 permite concluir que la tecnología ultrasónica se ha consolidado como una herramienta de intensificación con efectividad demostrada en una amplia diversidad de matrices minerales. Los estudios analizados abarcan desde minerales metálicos y no metálicos tradicionales, como cuarzo, grafito, magnesita y dolomita, hasta sulfuros de zinc, e incluyen residuos complejos, como los provenientes de placas de circuito impreso (WPCBS) y relaves de lixiviación oxidativa. Asimismo, documentan incrementos en la recuperación por flotación que oscilan entre 2 y 40 %, dependiendo de la mineralogía y las condiciones operativas. Este periodo evidencia un tránsito claro desde investigaciones de laboratorio hacia ensayos piloto y aplicaciones de campo, particularmente en flotación por espuma, lo que valida la creciente madurez del campo en los últimos ocho años.

El análisis de los fundamentos fisicoquímicos confirma que la mejora de la eficiencia de flotación no obedece a un único fenómeno, sino a la sinergia entre cuatro mecanismos principales: la cavitación acústica, la generación de microburbujas estables (de 1 a 100 µm), el flujo acústico y la modificación de los reactivos.

Respecto a los parámetros operativos, la literatura revisada permite establecer ventanas óptimas para procesos de flotación asistida por ultrasonido: frecuencias de 20 a 40 kHz resultan las más efectivas para la generación de microburbujas y la cavitación en pulpas minerales, mientras que frecuencias superiores (40 a 80 kHz) se orientan preferentemente a la limpieza superficial; potencias de 100 a 300 W han demostrado ser efectivas para escalas de laboratorio, con escalamiento proporcional para volúmenes industriales; y tiempos de tratamiento de 2 a 3 minutos constituyen el rango más eficiente para la mayoría de las matrices, pues tratamientos prolongados pueden inducir una fragmentación contraproducente de las partículas. Asimismo, la configuración del equipo influye de manera significativa, siendo los sistemas

de tipo bocina (20 kHz) más eficaces que los baños ultrasónicos (40 kHz) para la liberación de ganga incrustada y el incremento de la recuperación de carbono en grafito.

En consecuencia, se concluye que la tecnología ultrasónica constituye una alternativa viable para la modernización sostenible de la industria minera, toda vez que ofrece beneficios simultáneos en recuperación, ley de concentrados y reducción del consumo de reactivos. Se han documentado disminuciones de hasta el 40 % en la dosificación de colectores como el queroseno. Además, esta tecnología facilita el reciclaje de residuos electrónicos y la valorización de materiales ultrafinos que, de otro modo, se perderían en relaves. No obstante, su implementación a escala industrial aún enfrenta desafíos relacionados con el control riguroso de los parámetros acústicos, la estandarización de equipos para altos volúmenes de pulpa y la necesidad de estudios adicionales de escalamiento que garanticen la reproducibilidad de los resultados obtenidos en condiciones de laboratorio y piloto.

Finalmente, el futuro desarrollo de la tecnología dependerá de la convergencia entre avances en equipos multifrecuencia, sistemas de control adaptativo y una comprensión más profunda de la interacción entre las variables acústicas y la mineralogía específica de cada sistema, lo que promete avances significativos en la optimización continua de la flotación por espuma.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Sistema Estatal de Ciencia, Humanidades, Innovación y Tecnología (SECIHTI) la beca otorgada, que permitió llevar a cabo esta investigación. Los autores también reconocen el apoyo de la Universidad Autónoma de Coahuila por las facilidades brindadas durante el desarrollo del estudio.

REFERENCIAS

Aldrich, C., & Feng, D. (1999). Effect of ultrasonic preconditioning of pulp on the flotation of sulphide ores. *Minerals Engineering, 12*(6), 701–707. https://doi.org/10.1016/S0892-6875(99)00053-9

Altun, N. E., Hwang, J., & Hicyilmaz, C. (2009). Enhancement of flotation performance of oil shale cleaning by ultrasonic treatment. International *Journal of Mineral Processing, 91*(1–2), 1–13. https://doi.org/10.1016/j.minpro.2008.10.003

Barma, S. D., Baskey, P. K., Rao, D. S., & Sahu, S. N. (2019). Ultrasonic-assisted flotation for enhancing the recovery of flaky graphite from low-grade graphite ore. *Ultrasonics Sonochemistry, 56,* 386–396. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.04.033

Celik, M. S. (1989). Effect of ultrasonic treatment on the floatability of coal and galena. *Separation Science and Technology, 24*(14), 1159–1166. https://doi.org/10.1080/01496398908049894

Chen, C., Zhang, S., Liu, Q., Chen, L., Xian, Y., & Wang, Y. (2024). Ultrasonic pretreatment for enhancing flotation separation of elemental sulfur and silver-bearing lead minerals from an oxidative pressure leaching residue of zinc sulfide. *Minerals Engineering, 205,* Article 108495. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108495

Chen, L., He, J., Zhu, L., Yao, Q., Sun, Y., Guo, C., Chen, H., & Yang, B. (2023). Efficient recovery of valuable metals from waste printed circuit boards via ultrasound-enhanced flotation. *Process Safety and Environmental Protection, 169*, 869–878. https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.11.046

Chen, Y., Truong, V. N. T., Bu, X., & Xie, G. (2020). A review of effects and applications of ultrasound in mineral flotation. *Ultrasonics Sonochemistry, 60*, Article 104739. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104739

Deng, J., Luo, D., Bai, J., & Rong, K. (2024). Effect of ultrasonic pretreatment on flotation purification of quartz. *Physicochemical Problems of Mineral Processing, 60*(3), Article 190008. https://doi.org/10.37190/ppmp/190008

Djendova, S., & Mehandjiski, V. (1992). Study of the effects of acoustic vibration conditioning of collector and frother on flotation of sulphide ores. *International Journal of Mineral Processing, 34*(3), 205–217. https://doi.org/10.1016/0301-7516(92)90074-7

Donskoi, E., Collings, A. F., Poliakov, A., & Bruckard, W. J. (2012). Utilisation of ultrasonic treatment for upgrading of hematitic/goethitic iron ore fines. *International Journal of Mineral Processing*, 114–117, 80–92. https://doi.org/10.1016/j.minpro.2012.10.005

Ebrahimi, H., & Karamoozian, M. (2020). Effect of ultrasonic irradiation on particle size, reagents consumption, and feed ash content in coal flotation. International *Journal of Coal Science & Technology, 7*(4), 787–795. https://doi.org/10.1007/s40789-020-00307-2

Gungoren, C., Özkan, Ş. G., & Ozdemir, O. (2017). Different approaches in the use of ultrasonic treatments in flotation. Afyon Kocatepe University *Journal of Sciences and Engineering, 17*(2), 727–735. https://doi.org/10.5578/FMBD.57268

Hassani, F., Noparast, M., & Tonkaboni, S. Z. S. (2019). Enhancement of phosphate flotation by ultrasonic pretreatment. *Iranian Journal of Chemistry & Chemical Engineering, 38*(5), 251–266. https://doi.org/10.30492/IJCCE.2019.32272

Hassanzadeh, A., Sajjady, S. A., Gholami, H., Amini, S., & Özkan, Ş. G. (2020). An improvement on selective separation by applying ultrasound to rougher and re-Cleaner stages of copper flotation. *Minerals, 10*(7), Article 619. https://doi.org/10.3390/min10070619

Jaffe, B., Roth, R. S., & Marzullo, S. (1954). Piezoelectric properties of lead zirconate-lead titanate solid-solution ceramics. *Journal of Applied Physics, 25*(6), 809–810. https://doi.org/10.1063/1.1721741

Jiang, Y., Lu, J., Xie, Y., Lin, Z., & Wang, N. (2024). The effects of ultrasound modified kerosene on the flotation of flake graphite. *Separation Science and Technology, 59*(4), 612–620. https://doi.org/10.1080/01496395.2024.2328677

Li, C., Li, X., Xu, M., & Zhang, H. (2020). Effect of ultrasonication on the flotation of fine graphite particles: Nanobubbles or not? *Ultrasonics Sonochemistry, 69*, Article 105243. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105243

Mao, Y., Chen, Y., Bu, X., & Xie, G. (2019). Effects of 20 kHz ultrasound on coal flotation: The roles of cavitation and acoustic radiation force. *Fuel, 256*, Article 115938. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115938

Noltingk, B. E., & Neppiras, E. A. (1950). Cavitation produced by ultrasonics. *Proceedings of the Physical Society. Section B, 63*(9), 674–685. https://doi.org/10.1088/0370-1301/63/9/305

Ozkan, S. G. (2012). Effects of simultaneous ultrasonic treatment on flotation of hard coal slimes. Fuel, 93, 576–580. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.10.032

Ozkan, S. G. (2017). Further investigations on simultaneous ultrasonic coal flotation. *Minerals, 7*(10): Article 177. https://doi.org/10.3390/min7100177

Ozkan, S. G., & Kuyumcu, H. Z. (2006). Investigation of mechanism of ultrasound on coal flotation. *International Journal of Mineral Processing, 81*(3), 201–203. https://doi.org/10.1016/j.minpro.2006.07.011

Ozkan, S. G., & Kuyumcu, H. Z. (2007). Design of a flotation cell equipped with ultrasound transducers to enhance coal flotation. Ultrasonics Sonochemistry, 14(5), 639–645. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2006.10.001

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., . . . Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated

guideline for reporting systematic reviews. *BMJ, 372*, Article n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

Plesset, M. S. (1949). The dynamics of cavitation bubbles. *Journal of Applied Mechanics, 16*(3), 277–282. https://doi.org/10.1115/1.4009975

Shu, K. Q., Xu, L. H., Wu, H. Q., Wang, Z. J., Xu, Y. B., & Fang, S. (2019). Influence of ultrasound pre-treatment on ilmenite surface chemical properties and collectors' adsorption behaviour. *Ultrasonics Sonochemistry, 57*, 98–107. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.05.017

Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research, 104*, 333–339. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039

Ulusoy, U., & Kurşun, H. (2021). Review: Comparison of ultrasonically aided zinc beneficiation by mechanical flotation and column flotation cell. EUREKA: *Physics and Engineering,* (1), 3–13. https://doi.org/10.21303/2461-4262.2021.001608

Videla, A. R., Morales, R., Saint-Jean, T., Gaete, L., Vargas, Y., & Miller, J. D. (2016). Ultrasound treatment on tailings to enhance copper flotation recovery. *Minerals Engineering, 99*, 89–95. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.09.019

Yin, W., Ma, Y., & Wang, Y. (2023). Mechanism of ultrasonic cavitation to improve the effect of siderite on quartz flotation. *Physicochemical Problems of Mineral Processing, 59*(3), Article 165930. https://doi.org/10.37190/ppmp/165930

Yin, W., Wang, Y., Ma, Y., & Chen, K. (2024). Effects of ultrasonic treatment on the flotation behavior of magnesite and dolomite in a sodium oleate system. *Green and Smart Mining Engineering, 1*(1), 76–84. https://doi.org/10.1016/j.gsme.2024.03.002

Zhang, H., Du, M., Hu, H., Zhang, H., & Song, N. (2024). A review of ultrasonic treatment in mineral flotation: Mechanism and recent development. *Molecules, 29*(9), Article 1984. https://doi.org/10.3390/molecules29091984

Zhang, X., Cheng, H., Xu, K., Ding, D., Wang, X., Wang, B., & Ma, Z. (2024). Ultrasonic enhancement for mineral flotation: Technology, device, and engineering applications. *Minerals, 14*(10), Article 986. https://doi.org/10.3390/min14100986

Zhou, S., Tong, Z., Dong, L., Wang, H., Zhao, Y., & Duan, H. (2023). A comparative study on the influence of single and combined ultrasounds assisted flake graphite flotation. *Ultrasonics Sonochemistry, 98*, Article 106551. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106551

Zhou, W., Cao, W., Li, C., Peng, Y., Cui, Y., & Liuyang, D. (2025). Ultrasonic pulp conditioning-induced nanoparticles: A critical driver for sonication-assisted ultrafine smithsonite flotation. *Minerals, 15*(9), Article 927. https://doi.org/10.3390/min15090927

Zhou, Z. A., Xu, Z., Finch, J. A., Masliyah, J. H., & Chow, R. S. (2009). On the role of cavitation in particle collection in flotation—A critical review. *Minerals Engineering, 22*(5), 419–433. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.12.010

REVISIÓN

EVALUACIÓN DEL ESTADO ACTUAL DEL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN LA REGIÓN SURESTE DE COAHUILA

EVALUATION OF THE CURRENT STATE OF DOMESTIC WASTEWATER TREATMENT IN THE SOUTHEASTERN REGION OF COAHUILA

RODRÍGUEZ ZÚÑIGA, Diana Patricia

BENAVENTE VALDÉS, Juan Roberto

RESUMEN

En este artículo de revisión bibliográfica se analiza el estado actual del tratamiento de las aguas residuales domésticas en la región sureste de Coahuila. Mediante la recopilación de información en fuentes gubernamentales, en esta revisión se logró identificar que la mayoría de los acuíferos que surten a la región sureste de Coahuila están en condición de sobreexplotación y que el 59 % del agua extraída es para uso agrícola. También se encontró que solo dos de los cinco municipios de la región sureste (Saltillo y Ramos Arizpe) cuentan con sistemas de tratamiento de aguas residuales. El proceso de tratamiento de aguas residuales en estos dos municipios se basa en metodologías como la de lodos activados, la cual genera residuos que requieren un tratamiento especializado. Con esta revisión documental logramos identificar la importancia de realizar adecuaciones a los sistemas de tratamiento de aguas residuales de la región sureste de Coahuila y desarrollar políticas para la venta de los lodos activados o el agua residual tratada al sector agrícola o industrial, con la finalidad de recibir un apoyo económico para el mantenimiento de la planta de tratamiento y disminuir la gran demanda de agua potable de estos dos sectores.

Palabras cl ave: aguas residuales; planta tratadora de aguas residuales; reúso del agua; acuíferos.

Facultad de Ciencias Químicas,
Universidad Autónoma de Coahuila.
Saltillo, Coahuila, México.
.

ABSTRACT

This literature review article analyses the current state of domestic wastewater treatment in the south-eastern region of Coahuila. Information was compiled

Correspondencia
d-zuniga@uadec.edu.mx
https://orcid.org/0000-0003-4634-3378

Fecha de recepción
16 de enero de 2026.
Fecha de aceptación
20 de junio de 2026.

from government sources. This review identified that most of the aquifers that supply the southeastern region of Coahuila are overexploited and that 59 % of the water extracted is for agricultural use. It also found that only two of the five municipalities in the southeastern region (Saltillo and Ramos Arizpe) have wastewater treatment systems. The wastewater treatment process in these two municipalities is based on methodologies such as activated sludge, which generates waste that requires specialised treatment. Through this documentary review, we were able to identify the importance of making adjustments to the wastewater treatment systems in the southeastern region of Coahuila and developing policies for the sale of activated sludge or treated wastewater to the agricultural or industrial sector, with the aim of receiving financial support for the maintenance of the treatment plant and reducing the high demand for drinking water from these two sectors.

Keywords: *wastewater; wastewater treatment plant; water reuse; aquifers.*

INTRODUCCIÓN

En los últimos diez años, la población en Coahuila de Zaragoza ha crecido un 14.5 %, pasando de 2.7 millones de habitantes a 3.1 millones de habitantes en el 2020 (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2020). Esto ha conllevado la disminución del agua disponible por habitante. CONAGUA reporta que Coahuila es uno de los estados con menor disponibilidad de agua per cápita y se encuentra en el puesto 22 de los 32 estados de México en la escala de disponibilidad de agua, según los datos más recientes (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2023). Esta clasificación ordena a las entidades federativas según su disponibilidad de recursos hídricos renovables por habitante, de mayor a menor. La posición de Coahuila refleja una disponibilidad moderada, y se encuentra por debajo de la media estatal.

Coahuila está compuesta por 38 municipios, de los cuales cinco componen la región sureste: Arteaga, General Cepeda, Parras de la Fuente, Saltillo y Ramos Arizpe, con una población de 296,149, la cual representa el 9.41 % de la población total del estado. Los municipios con la mayor tasa de crecimiento poblacional de Coahuila son Ramos Arizpe (5.1 %), Arteaga (2.8 %) y Saltillo (2.0 %), estando por encima de la media del estado, que es de 1.4 %, lo que indica que la región sureste de Coahuila requiere una adecuada

gestión y planeación de los recursos hídricos para evitar desequilibrios por el crecimiento poblacional (INEGI, 2023).

No debemos olvidar que Coahuila es el tercer estado del país donde menos llueve, en promedio 400 milímetros anuales, muy por debajo de la media nacional que oscila alrededor de los 750 milímetros anuales. Las escasas lluvias y el clima cálido hacen que las fuentes de agua sean pocas e insuficientes (Jefatura de Gabinete y Proyectos Estratégicos, 2024).

Por lo cual, es importante conocer la disponibilidad de los recursos hídricos de la zona y los procesos de tratamiento de aguas residuales para implementar estrategias que permitan la adecuada gestión de los recursos hídricos, desde las concesiones de agua otorgadas a las empresas hasta el tratamiento y reutilización de aguas residuales.

En este contexto, realizar una revisión documental del estado actual de las aguas residuales en la región sureste de Coahuila es una herramienta esencial para comprender las capacidades y limitaciones existentes. Dicha revisión permitirá identificar la disponibilidad de aguas subterráneas, el potencial de reúso de las aguas residuales, la infraestructura y las tecnologías disponibles para el tratamiento de las aguas residuales. Por último, esta revisión servirá de guía para el diseño de políticas públicas y el diseño de nuevos proyectos que atiendan los desafíos en la gestión de aguas residuales en la región.

METODOLOGÍA

Se empleó un enfoque documental con carácter descriptivo-exploratorio para analizar el estado actual del tratamiento de aguas residuales domésticas en la región sureste de Coahuila. Este enfoque permitió recopilar información relevante sobre la disponibilidad de agua potable, concesiones de agua potable al área industrial, plantas de tratamiento de aguas residuales, infraestructura, tecnologías innovadoras y problemáticas hídricas de la región.

Se utilizaron fuentes gubernamentales como la Comisión Nacional de Agua (CONAGUA), el Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales (SNIARN), la Secretaría de Estado de Medio Ambiente (SMA), el Sistema Nacional de Información del Agua (SINA), la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y el Sistema Integral de Información Ambiental del Estado de Coahuila (SIIAEC).

Además, se realizaron entrevistas a expertos pertenecientes a las oficinas de la Comisión Estatal de Aguas y Saneamiento (CEAS) y a la Secretaría de Medio Ambiente del Estado de Coahuila, en el campo del tratamiento de aguas residuales, incluyendo autoridades locales, ingenieros ambientales y representantes de instalaciones de tratamiento. Para finalizar, se realizaron inspecciones in situ de las plantas municipales de tratamiento de aguas residuales para evaluar la infraestructura física.

DESARROLLO Y DISCUSIÓN

VOLUMEN DE EXTRACCIÓN DE AGUA Y DÉFICIT ANUAL POR ACUÍFEROS

La región sureste cuenta con ocho acuíferos subterráneos, los cuales son: 0502-Cañón del Derramadero, 0505-General Cepeda-Sauceda, 0508-Paredón, 0509-la Paila, 0510-Saltillo-Ramos Arizpe, 0511-región Manzanera-Zapalinamé, 0521-Saltillo sur y 0527-Valle de San Marcos (Subsecretaría de Recursos Naturales, 2022). En la figura 1 se observa que el volumen de extracción de las aguas subterráneas (VEAS) de seis de los ocho acuíferos presentes en la región supera el volumen de recarga total anual, lo que genera estrés hídrico en el sureste (CONAGUA, 2023). Esto evidencia un desafío significativo en la gestión sostenible del agua, con un gran impacto en el abastecimiento de agua para la población, la agricultura y la industria. Esta situación resalta la necesidad urgente de implementar medidas eficaces para la conservación del agua y la reutilización de las aguas residuales.

En la figura 1, R es la recarga total media anual del acuífero, DNC es la descarga natural comprometida y VEAS es el volumen de extracción de aguas subterráneas. No hay volumen disponible para otorgar nuevas concesiones. Se encuentra en situación de sobreexplotación.

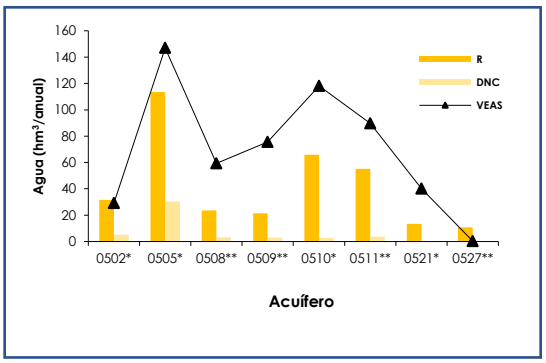


Figura 6. Volumen de extracción de agua y déficit anual por acuíferos en la región sureste de Coahuila.

Es importante destacar que los acuíferos 0508, 0509, 0511 y 0527 se encuentran en situación de sobreexplotación (CONAGUA, 2023). En la Figura 2 se observa que el 59 % del agua extraída de los acuíferos se destina al uso agrícola. El hecho de que el mayor porcentaje del agua se destine al sector agrícola subraya la importancia de la agricultura en la economía del sureste de Coahuila. Esto implica buscar estrategias que permitan reutilizar las aguas residuales tratadas para riego; un ejemplo de ello son países como Israel y España, que promueven estas prácticas sostenibles (Mendoza-Retana et al., 2021).

El 23 % del agua extraída de los acuíferos se destina al uso público urbano, lo que refleja la demanda de agua en áreas urbanas para servicios públicos (CONAGUA, 2023). Es importante destacar que el crecimiento urbano y la expansión de la infraestructura pueden ejercer presión sobre los suministros de agua, lo que destaca la necesidad de una gestión eficiente y sostenible de los recursos hídricos.

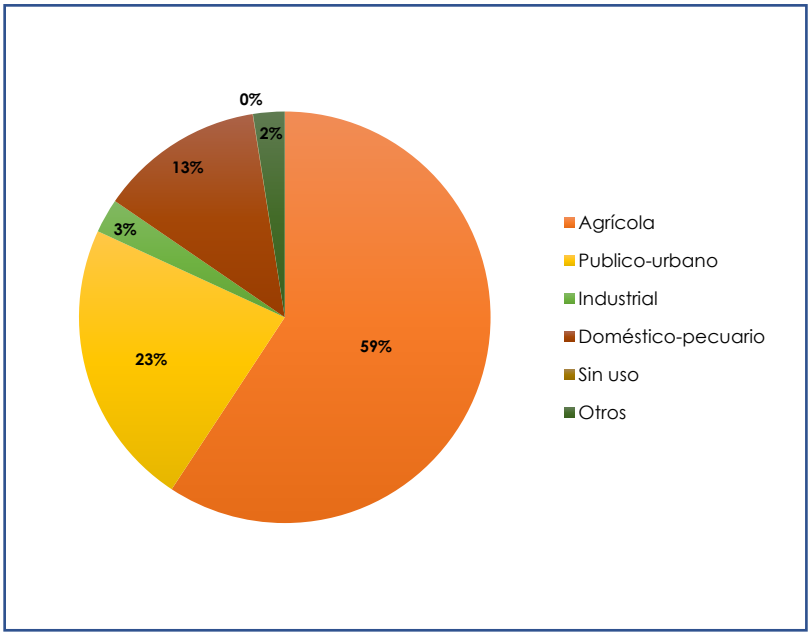


Figura 2. Aprovechamientos activos en los acuíferos del sureste de Coahuila. Adaptado de datos de CONAGUA (2023).

El hecho de que solo el 3 % del agua extraída de los acuíferos se destine al uso industrial indica que, hasta el momento, el sector industrial tiene un impacto relativamente limitado en el consumo total de agua en la región

(CONAGUA, 2023). Sin embargo, es importante monitorear y gestionar adecuadamente este uso, especialmente ante el crecimiento industrial que experimentan ciudades como Saltillo y Ramos Arizpe.

Los resultados arrojados en la figura 2 destacan la necesidad de abordar los desafíos que presenta el sector de la agricultura en la alta demanda de agua, incitando a la búsqueda de nuevas prácticas de irrigación eficiente para ayudar a reducir la presión sobre los acuíferos agotados del sureste de Coahuila (FDA, 2024).

COBERTURA DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO

Coahuila se encuentra en el puesto cuatro entre los estados con mayor cobertura de agua potable (98.90 %). Esto sitúa al estado por encima de la cobertura nacional que es del 96 % (CONAGUA, 2023). Esto refleja el alto porcentaje de la población con acceso equitativo y continuo al agua segura, suficiente y de calidad para satisfacer sus necesidades básicas. En materia de alcantarillado, de acuerdo con los resultados del Censo 2020, Coahuila cuenta con una cobertura del 98.60 %, lo que la posiciona en el puesto seis entre los 32 estados con mayor cobertura, por encima del promedio nacional (95.2 %) (CONAGUA, 2023).

En cuanto a la desinfección del agua, Coahuila cuenta con 137 plantas potabilizadoras, de las cuales seis cuentan con tratamiento mediante clarificación convencional con sedimentación, once con filtración directa, diecisiete con ósmosis inversa y 103 con ósmosis inversa con suavizador. Se reporta que el estado cuenta con una cobertura del 99 % en la desinfección del agua potable, superior a la media nacional de 97.5 % (CONAGUA, 2023).

Estos resultados indican los esfuerzos del Estado y la nación para realizar inversiones en el sector del agua potable, donde el de mayor inversión económica por parte de la nación a lo largo del tiempo es el de agua potable.

Con esta revisión destacamos que este indicador no solo depende de la cantidad de personas atendidas, sino también de la eficiencia en la distribución, el mantenimiento de la infraestructura y el cumplimiento de normas de potabilidad. Además, el servicio debe ser económicamente accesible y abarcar tanto áreas urbanas como rurales.

PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN EL SURESTE DE COAHUILA

En el sector de saneamiento, Coahuila se ubica en el puesto dieciséis a nivel nacional, con una cobertura de 66.3 %, por debajo de la media nacional de 67.5 %. Las aguas residuales domésticas que Coahuila genera son de 8672 L/s, de las cuales recolecta 7058 L/s y trata 4682 L/s. De acuerdo con los datos de CONAGUA, se enlistan 27 PTAR que tratan un caudal de 4682 L/s de aguas residuales, con una capacidad máxima de 5737 L/s (CONAGUA, 2023).

Las plantas de tratamiento de aguas residuales de Coahuila llevan a cabo sus procesos de tratamiento mediante metodologías biológicas. En la figura 3 se muestra que el sistema de tratamiento más utilizado en Coahuila es el de lodos activados, que trata el 67.9 % de las aguas residuales generadas en el estado; le siguen las lagunas de estabilización, que tratan el 31.2 %; los discos biológicos, que tratan el 0.85 %; y los tanques sépticos, que tratan el 0.02 % (CONAGUA, 2023).

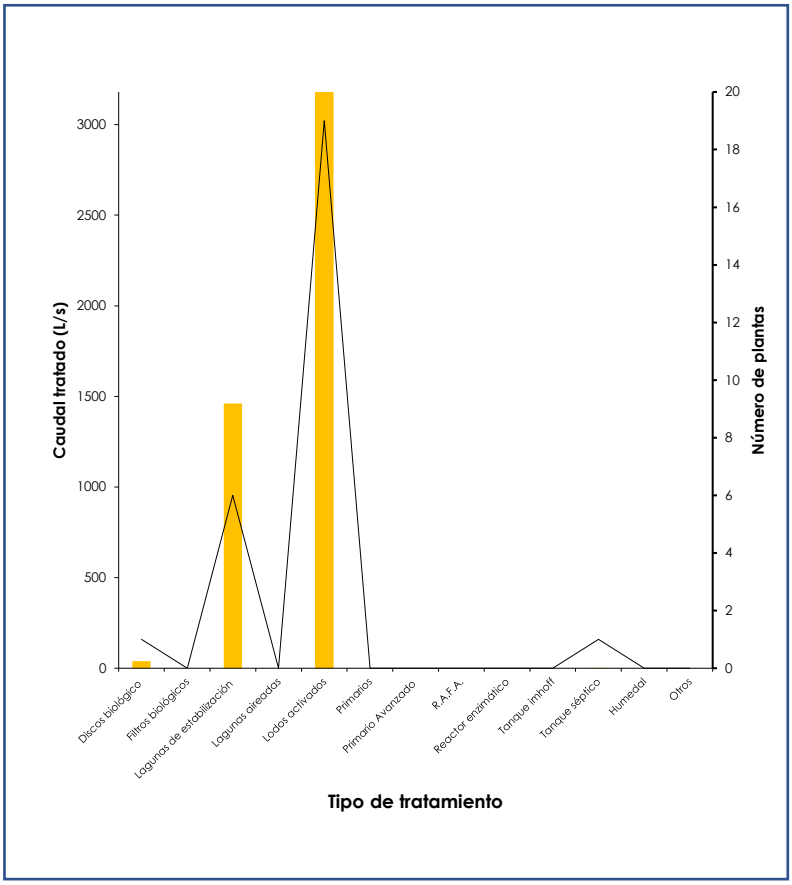


Figura 3. Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en operación, según el proceso de tratamiento y el caudal tratado. Adaptado de CONAGUA, 2023b.

En la región sureste de Coahuila, los municipios de Arteaga y Parras de la Fuente carecen de plantas municipales de tratamiento de aguas residuales. Ambas localidades habían iniciado proyectos para la construcción de una planta de tratamiento con capacidad de 120 L/s utilizando el método de lodos activados (Comisión Estatal de Aguas y Saneamiento – SEVOT, 2023). Sin embargo, estos proyectos se han visto interrumpidos por la falta de capacidad económica para cubrir los gastos operativos asociados a la planta de tratamiento, en particular los costos mecánico-eléctricos, que oscilan entre quinientos y seiscientos millones de pesos anuales.

General Cepeda contaba con una planta de tratamiento de lodos activados con aireación extendida, con una capacidad de 10 L/s. Esta planta fue inaugurada en 2018 y dejó de operar en 2019 debido a la incapacidad para cubrir los costos operativos asociados (Comisión Estatal de Aguas y Saneamiento – SEVOT, 2023).

El municipio de Ramos Arizpe dispone de una planta de tratamiento con una capacidad de 100 L/s, que utiliza un sistema de tratamiento que incluye un filtro de banda y lodos activados (Comisión Estatal de Aguas y Saneamiento –SEVOT, 2023).

De los cinco municipios que componen la región sureste de Coahuila, solo Saltillo y Ramos Arizpe cuentan con sistemas de tratamiento de aguas residuales, lo que permite evaluar de manera exhaustiva la capacidad, la eficiencia y el estado operativo de cada instalación.

Saltillo cuenta con siete plantas de tratamiento de aguas residuales, de las cuales seis están activas. El 85.7 % de estas plantas usa lodos activados y el 14.2 % usa reactores anaerobios. Esto deja al descubierto que los sistemas de tratamiento utilizados en Coahuila no implementan tecnologías emergentes para el tratamiento de las aguas residuales, como las microalgas, para la eliminación de nitrógeno y fósforo.

REÚSO DEL AGUA RESIDUAL TRATADA EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE SALTILLO

Las aguas residuales tratadas tienen diversos destinos. En la figura 4 se puede observar que la mayor proporción, el 45 % del agua tratada, se descarga en cuerpos receptores como ríos o arroyos. Este enfoque puede tener implicaciones ambientales y requiere monitoreo para garantizar el

cumplimiento de los estándares de calidad del agua. El 33 % del agua tratada se destina al reúso industrial y agrícola, lo que señala una práctica positiva de economía circular. Este enfoque puede contribuir a la sostenibilidad al reducir la demanda de agua fresca para usos industriales y agrícolas, al tiempo que minimiza la descarga de aguas tratadas en los cuerpos de agua receptores. El 22 % del agua tratada se destina al riego de parques. Esto refleja una utilización directa para fines paisajísticos y recreativos (Comisión Estatal de Aguas y Saneamiento SEVOT, 2023). Esta aplicación puede tener beneficios estéticos y sociales, contribuyendo al mantenimiento de los espacios verdes y a la calidad de vida de la comunidad.

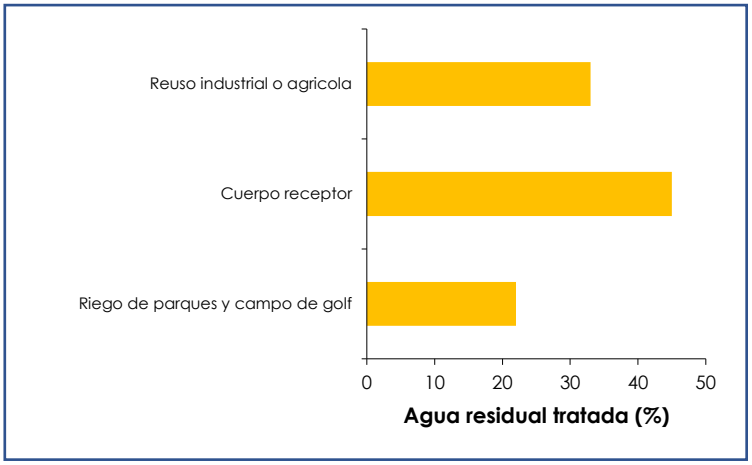


Figura 4. Análisis de la disposición de las aguas residuales tratadas por las plantas de tratamiento de Saltillo. AR, agua residual. Adaptado de la Comisión Estatal de Aguas y Saneamiento, SEVOT (2024).

El reúso industrial y agrícola y el riego de parques son prácticas que promueven la sostenibilidad ambiental al maximizar la utilidad de las aguas tratadas y reducir la carga sobre los cuerpos receptores (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2023). Dada la diversidad de destinos de las aguas tratadas, es crucial implementar regulaciones y sistemas de monitoreo robustos para garantizar la conformidad con los estándares ambientales y de salud.

La venta de aguas residuales tratadas para su reúso industrial y agrícola desempeña un papel crucial en el sostenimiento financiero de las plantas de tratamiento de Saltillo, al proporcionar una fuente adicional de ingresos. Este flujo de ingresos puede ayudar a cubrir los costos operativos, incluidos los gastos mecánico-eléctricos, el mantenimiento y los costos de personal.

Al diversificar las fuentes de ingresos, las plantas de tratamiento pueden depender menos de las tarifas de tratamiento impuestas a los municipios o entidades gubernamentales. La venta a la industria crea un modelo más resiliente y sostenible desde el punto de vista financiero.

CONCLUSIONES

En el sureste de Coahuila, la situación actual de las aguas residuales evidencia tanto avances como retos significativos en su gestión y tratamiento. Actualmente, solo dos de los cinco municipios de la región cuentan con sistemas de tratamiento, lo que subraya la necesidad de que el sector público desarrolle estrategias eficaces para garantizar la cobertura en toda la región.

Es fundamental que las nuevas plantas de tratamiento incluyan enfoques innovadores, como la comercialización de aguas residuales tratadas para uso agrícola o industrial, con el fin de reducir los costos mecánico-eléctricos del sistema y garantizar su sostenibilidad a largo plazo.

Los resultados de esta revisión documental destacan que el método de tratamiento más utilizado es el de lodos activados, que genera residuos cuyo manejo incrementa los costos operativos. Por ello, es importante explorar alternativas innovadoras, como el uso de microalgas, que no solo permiten tratar las aguas residuales, sino también obtener biomasa rica en biocompuestos con aplicaciones en la industria de alimentos para animales o en la producción de biocombustibles.

REFERENCIAS

Comisión Estatal de Aguas y Saneamiento –SEVOT. (2023). Retrieved January 14, 2025, from https://ceascoahuila.gob.mx/

CONAGUA. (2023). Conagua / Disponibilidad por acuíferos. https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Disponibilidad_Acuiferos.html

CONAGUA. (2023). Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Comisión Nacional del Agua, 2023. www.gob.mx/conagua

FDA (2024). Norma final de la FSMA sobre agua de uso agrícola en la precosecha. https://www.fda.gov/food/food-safety-modernization-act-fsma/norma-final-de-la-fsma-sobre-agua-de-uso-agricola-en-la-precosecha

Gobernación de Coahuila. (2024). Gobierno De Coahuila. https://coahuila.gob.mx/

INEGI (2020). Censos de Población y Vivienda 1900-2020.

INEGI (2023). México en cifras. Coahuila de Zaragoza. https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/#collapse-Indicadores

Jefatura De Gabinete y proyectos estratégicos. (2024). Plan estatal de desarrollo Coahuila 2023-2029. www.coahuila.gob.mx

Mendoza-Retana, S.S., Cervantes-Vázquez, M.G., Valenzuela-Garcia, A.A., Guzmán-Silos, T.L., Orona-Castillo, I., Álvaro Cervantes-Vázquez, T.J. (2021). Uso potencial de las aguas residuales en la agricultura. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12 (1): 115-126. https://doi.org/10.29312/remexca.v12i1.2789.

ONU (2023). Las aguas residuales pueden proporcionar energía a 500 millones de personas-Noticias ONU. https://news.un.org/es/story/2023/08/1523557

REVISIÓN

REDES METALORGÁNICAS LUMINISCENTES DE ZN(II) COMO AGENTES QUIMIOSENSORES EN LA DETECCIÓN DE PESTICIDAS EN RECURSOS HÍDRICOS

LUMINESCENT ZN(II) METALORGANIC FRAMEWORKS AS CHEMOSENSING AGENTS FOR PESTICIDE DETECTION IN WATER RESOURCES

ROSALES VÁZQUEZ, Luis David [1]

MORALES LUCKIE, Raúl Alberto [2]

SÁNCHEZ MENDIETA, Víctor [2]

TÉLLEZ LÓPEZ, Antonio [1]

RESUMEN

La aplicación extensa de pesticidas y herbicidas en los sectores agrícola y doméstico exige un avance continuo en las tecnologías de su detección y monitoreo. Dada la amenaza ambiental y sanitaria que representa la bioacumulación de estas especies tóxicas en fuentes hídricas, alimentos y suelos, existe una necesidad imperativa y creciente de desarrollar métodos de detección en tiempo real, que sean económicos, precisos y que operen eficientemente en muestras ambientales complejas. En los últimos años, el uso de redes metalorgánicas (MOF) luminiscentes en su aplicación como sensores de contaminantes del agua ha brindado resultados prometedores, como una alternativa eficiente, selectiva, económica y reproducible para el monitoreo de sustancias tóxicas en cuerpos acuáticos. Particularmente, los MOF basados en Zn(II) destacan debido a su estructura robusta, propiedades luminiscentes y prometedora biocompatibilidad en la detección óptica de agroquímicos nocivos. Estos materiales quimiosensores fundamentan su mecanismo de respuesta en procesos primarios de transferencia de carga y emisión intraligante. Esta capacidad permite el análisis cuantitativo de contaminantes peligrosos mediante la medición de sus propiedades de luminiscencia en tiempo real. Por consiguiente, en el presente artículo se destacan ejemplos recientes que ilustran el diseño estructural y as capacidades de reconocimiento selectivo y respuesta fluorescente de estos arreglos de coordinación cristalinos basados en Zn(II), para la cuantificación directa y precisa de pesticidas y herbicidas de uso común en muestras reales de sistemas acuáticos.

Palabras clave: detección de pesticidas; fluorescencia; MOF; Zn(II).

1. División de Ingeniería Industrial e Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica del Valle de Toluca. Almoloya de Juárez, Estado de México, México.

2. Facultad de Química, Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable (CCIQS), Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, Estado de México, México.

Correspondencia
ld_222@hotmail.com
https://orcid.org/0000-0002-9704-5146

Fecha de recepción
5 de febrero de 2026.
Fecha de aceptación
14 de mayo de 2026.

ABSTRACT

The widespread application of pesticides and herbicides in agricultural and domestic settings underscores the necessity for continuous advancements in monitoring technology. Given the critical environmental and health risks associated with the bioaccumulation of these noxious species in water sources, food products, and soil, an imperative and evolving need exists for new, real-time, economical, and precise sensing techniques effective within complex environmental samples. This paper addresses this technological deficiency by providing a critical overview of the state-of-the-art in utilizing Luminescent Metal-Organic Frameworks (LMOF). *Specifically, the review highlights Zn-based* LMOF *chosen for their robust structure, high porosity, and promising biocompatibility for the optical detection of these harmful agrochemicals. Emphasis is placed on their proven efficacy in aqueous media and real-sample analysis. These chemosensory materials derive their emission primarily from charge transfer and intraligand emission processes. Such mechanisms enable the quantitative analysis of hazardous pollutants by tracking dynamic alterations in their luminescence properties in real-time. Accordingly, the article reviews recent examples illustrating the structural design, luminescence performance, and selective recognition capabilities of these Zn(II)-based crystalline coordination arrays for the direct and accurate quantification of common pesticides and herbicides in aqueous systems.*

Keywords: MOF; *Zn, luminescent properties; sensing of pesticides and herbicides.*

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la producción y el suministro de alimentos enfrentan desafíos importantes, impulsados por la necesidad de sostener las tasas de consumo ante el crecimiento demográfico mundial (Tilman et al., 2011). Desde hace décadas, el cultivo eficiente de las cosechas se ha basado en la aplicación de agroquímicos, como pesticidas y herbicidas.

Los plaguicidas empleados en la agricultura moderna comprenden una amplia variedad de compuestos químicos clasificados según su función: insecticidas (que controlan plagas de insectos), herbicidas (que eliminan

malezas) y fungicidas (que combaten hongos patógenos), entre otros. Desde el punto de vista estructural, los grupos más relevantes incluyen los organofosforados (paratión, clorpirifos, acefato), los neonicotinoides (imidacloprid, dinotefuran, nitenpiram), los bipiridilos (paraquat, diquat), los organoclorados (2,6-dicloro-4-nitroanilina) y los benzimidazoles (carbendazim, metil-tiofanato), los cuales se encuentran ampliamente distribuidos en cultivos de uso global. La figura 1 ilustra las estructuras químicas representativas de los pesticidas y herbicidas de mayor interés en este estudio.

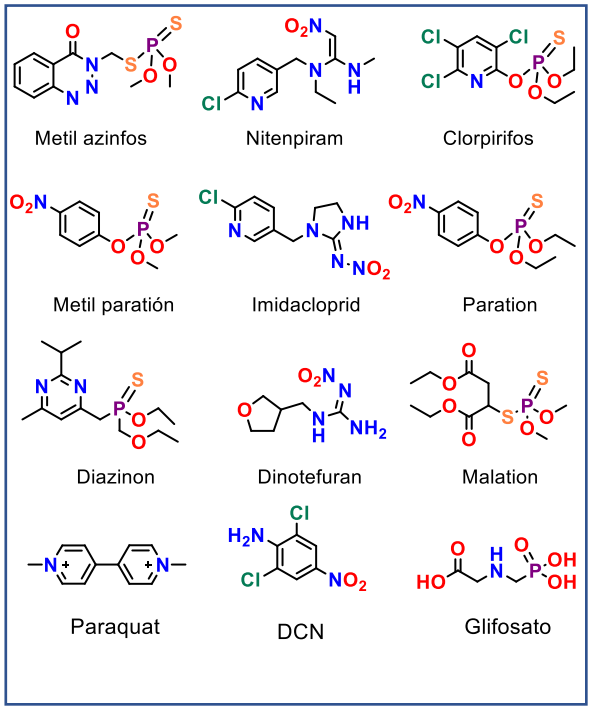


Figura 1. Pesticidas y herbicidas de uso común

A pesar de los esfuerzos por implementar técnicas de producción más limpias, la mayor parte de la producción alimentaria vegetal global sigue dependiendo de estas sustancias (Popp et al., 2013). En este contexto, es importante resaltar que solamente el 1 % de los pesticidas aplicados alcanza su especie objetivo (Pimentel, 1995), mientras que el 99 % restante tiende a bioacumularse en la cadena trófica, así como en los cuerpos de agua, generando daños ambientales irreversibles y problemas de salud graves en humanos (Aktar et al., 2009; Damalas & Eleftherohorinos, 2011). Entre ellos destacan los trastornos neurológicos, vinculados al aumento del riesgo de las

enfermedades de Parkinson y de Alzheimer, disrupciones endocrinas que afectan la función reproductiva y el desarrollo, y un mayor riesgo de desarrollar diversos tipos de cáncer (Mnif et al., 2011; Mostafalou & Abdollahi, 2013). Estos compuestos pueden actuar como genotóxicos y mutagénicos, además de interferir con la señalización celular y la función inmunológica normal, lo que resalta la necesidad de un monitoreo y una regulación estrictos (Carvalho, 2017).

Aunque existen técnicas analíticas con buena sensibilidad para detectar estos compuestos, como la cromatografía de gases o la espectrometría de masas, su implementación in situ se ve limitada por la necesidad de preparar muestras especializadas y el alto costo del equipamiento (Chauhan et al., 2017; Hernández et al., 2013; Lozowicka, 2015). Es aquí donde técnicas como la fluorescencia emergen como métodos de detección eficientes, rápidos y simples para compuestos orgánicos nocivos, mediante la aplicación de sondas fluorescentes capaces de detectar dichos agentes contaminantes (Wang et al., 2019).

Las redes metalorgánicas (MOF, por sus siglas en inglés), particularmente las luminiscentes, han demostrado ser sondas muy eficaces, selectivas y, a menudo, reciclables en su aplicación en la quimiodetección luminiscente de especies nocivas (Hu et al., 2013). La ventaja de estas redes de coordinación radica en la facilidad para modular su estructura y propiedades de fluorescencia, junto con la creciente estabilidad en medios acuosos, una característica indispensable para el análisis práctico de muestras reales.

El diseño de MOF luminiscentes suele estar enfocado en su ensamblaje con ligantes π-π conjugados cuya función, además de servir como puentes entre los nodos metálicos, es promover los mecanismos de emisión conocidos, tales como la emisión centrada en el ligante (CL), las transferencias de carga (TC); Ligante-Metal (TCLM), Metal-Ligante (TCML) y Ligante-Ligante (TCLL). En el caso de los centros metálicos, que fungen como nodos estructurales de las redes, destaca el uso de lantánidos, iones que por sí mismos poseen propiedades luminiscentes y que se ven amplificadas por los ligantes mediante el conocido "efecto antena" (Hasegawa & Kitagawa, 2022). Notablemente, sobre todo desde el punto de vista económico, son de interés los metales diamagnéticos de capa cerrada, cuyos procesos de relajación tras una incidencia de energía resulten en mecanismos radiativos. Entre ellos destacan los MOF basados en Zn(II), cuya disponibilidad, accesibilidad, bajo costo y potencial biocompatibilidad los han colocado como candidatos idóneos y de auge

creciente en la detección de pesticidas y herbicidas en agua en los últimos años (Wang et al., 2019).

La elección de los MOF de Zn(II) como eje central de esta revisión responde además a otros atributos inherentes del metal: en primer lugar, su configuración electrónica d^{10} favorece transiciones intraligante con rendimientos cuánticos comparativamente elevados; en segundo lugar, la literatura reciente evidencia un crecimiento notable en el número de reportes de detección de pesticidas y herbicidas basados específicamente en Zn(II)-MOF, con límites de detección inferiores a los máximos permitidos por regulaciones internacionales (Rosales-Vázquez et al., 2021); y en tercer lugar, la versatilidad sintética del Zn(II) para adoptar distintas geometrías de coordinación permite diseñar arquitecturas porosas con cavidades adaptadas a analitos de interés agronómico, características que en conjunto los posicionan como una de las plataformas más prometedoras y activas en el campo de la quimiodetección óptica de agroquímicos (Wang et al., 2019). Ante dicha tendencia, resulta conveniente y de particular interés destacar el estado del arte de estos materiales híbridos funcionales en su contribución al control de contaminantes y a la mitigación de sus efectos adversos en sistemas hídricos. En el presente artículo se profundiza en la revisión bibliográfica de dichos materiales en su aplicación específica en medios acuosos, primero mencionando las principales características de diseño de MOF luminiscentes de Zn(II) para la detección de pesticidas y herbicidas, y posteriormente abordando ejemplos recientes en la literatura.

METODOLOGÍA

1. ALCANCE Y DISEÑO DE LA REVISIÓN

La presente contribución se desarrolló bajo el diseño de una revisión bibliográfica sistemática de alcance descriptivo-analítico. El trabajo se orientó a consolidar el conocimiento generado en torno al diseño, las propiedades fotofísicas y el desempeño como quimiosensor de las redes metalorgánicas luminiscentes basadas en Zn(II) para la detección de pesticidas y herbicidas en agua. Se dio mayor importancia al análisis comparativo entre sistemas para identificar tendencias en el diseño de ligantes, mecanismos de sensado

predominantes y parámetros analíticos relevantes (límite de detección, selectividad y aplicabilidad en muestras reales).

2. BÚSQUEDA BIBLIOGRÁFICA

La búsqueda de literatura se restringió a revistas científicas especializadas indexadas en las bases de datos *ScienceDirect*, *Scopus* y *Web of Science*. Como criterio de calidad editorial, se estableció un factor de impacto mínimo de 2.0 (Journal Impact Factor, JCR), garantizando la inclusión de publicaciones con un riguroso proceso de revisión por pares y alta visibilidad en la comunidad científica internacional. Todas las fuentes consultadas corresponden a artículos escritos en inglés publicados entre 2009 y 2024, con especial atención a trabajos de los últimos seis años, dado el crecimiento acelerado en el desarrollo de Zn(II)- mof con aplicaciones de quimiodetección. La búsqueda se estructuró a partir de un conjunto de términos y frases clave, específicamente seleccionados para cubrir los tres ejes temáticos del artículo: (i) la química de coordinación del Zn(II) en mof; (ii) la fotofísica y luminiscencia de los materiales; y (iii) la aplicación analítica para la detección de agroquímicos en agua. Los términos empleados (tanto de forma independiente como combinados mediante los operadores booleanos AND, OR y NOT) incluyeron, entre otros:

- *Zn(II) metal-organic framework* AND *luminescent* AND *pesticide*
- *Zn*-mof AND *fluorescence sensing* AND *aqueous detection*
- *metal-organic framework* AND *turn-off fluorescence* AND *herbicide*
- *Zn-based* mof AND *ratiometric sensor* AND *herbicide* OR *pesticide*
- *metal-organic framework* AND *water stability* AND *pesticide limit of detection*
- *Zn(II) coordination network* AND *real water sample*
- *luminescent Zn-* mof AND *pesticide* OR *herbicide*
- *metal-organic framework* NOT *lanthanide* AND *pesticide sensing*

3. SELECCIÓN Y EVALUACIÓN DE LA CALIDAD

La incorporación de cada referencia al análisis requirió el cumplimiento simultáneo de los siguientes criterios: publicación en revista indexada con factor de impacto ≥ 2.0; reporte explícito de al menos un parámetro analítico cuantitativo (límite de detección, constante de Stern-Volmer o porcentaje de

recuperación en muestra real) y uso de Zn(II) como nodo metálico principal del mof. Se excluyeron revisiones que no incluyeran datos experimentales originales, reportes de sensores no luminiscentes y trabajos en los que la detección se llevara a cabo exclusivamente en disolventes orgánicos, sin aplicación en medio acuoso o muestra ambiental.

4. Organización y análisis comparativo

La información extraída de los estudios seleccionados se sistematizó en la sección de «Desarrollo y discusión», en la que se abordaron las características generales para el diseño de mof luminiscentes en la detección de pesticidas, en torno a tres ejes analíticos: (1) el diseño estructural y la estabilidad hidrolítica del Zn(II)- mof; (2) la naturaleza de las unidades fotoactivas y los mecanismos de modulación de la fluorescencia en presencia del analito; y (3) el desempeño quimiosensor cuantificado por los parámetros analíticos reportados. Posteriormente, esta información se plasmó en ejemplos con las vertientes principales que cumplen con los parámetros de diseño y funcionalidad. Esta estructura de análisis orientó tanto la organización de la tabla 1 como la secuencia de las secciones de desarrollo y discusión del presente artículo.

La síntesis final de los hallazgos se realizó de forma comparativa y crítica, confrontando los sistemas revisados en función de sus estrategias de diseño, de la selectividad lograda y de su aplicabilidad práctica en matrices acuosas complejas.

Desarrollo y discusión

1. Características generales para el diseño de mof luminiscientes de Zn(II) en la detección de pesticidas y herbicidas

La construcción de MOF luminiscentes para la detección óptica de pesticidas y herbicidas debe considerar tres elementos esenciales: (1) estabilidad química en medios acuosos, (2) emisión estable, que requiere de unidades fotoactivas que permitan mediciones reproducibles, es decir, sistemas que puedan ser monitoreados bajo parámetros de medición accesibles, robustos y repetibles

en su uso cotidiano, y (3) sitios de interacción complementarios cuya presencia les brinda la oportunidad de inducir procesos de unión selectiva y generar una respuesta analítica confiable. Estos principios se ilustran en la figura 2, donde se esquematizan los factores críticos en dicho diseño.

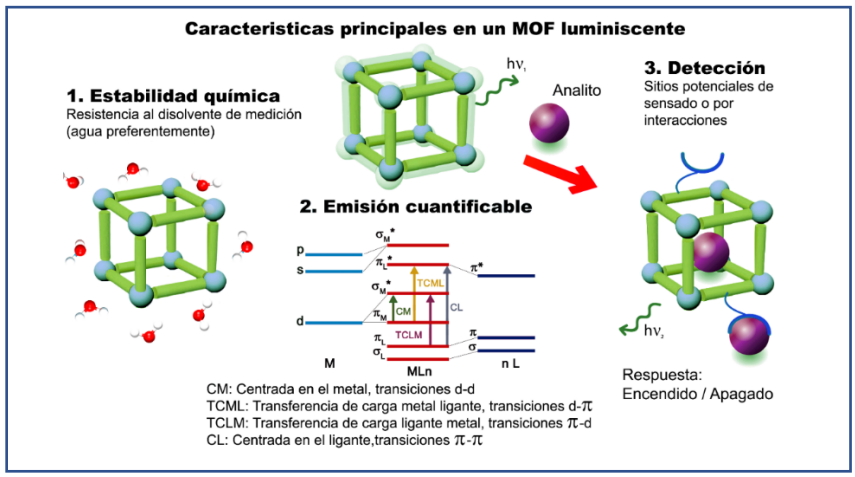


Figura 7. Claves en el diseño de MOF con aplicación en la detección luminiscente de pesticidas y herbicidas, considerando: (1) la estabilidad química en agua, (2) los procesos de emisión y (3) los sitios de unión para el analito.

1.1 Estabilidad en agua

La estabilidad frente al agua es un requisito indispensable para la aplicación práctica de estos materiales en ambientes reales. Los MOF de Zn(II) han sido ampliamente utilizados como quimiosensores para la cuantificación selectiva de aniones inorgánicos (haluros, oxoaniones) (Li et al., 2015; Zhang et al., 2014), cationes metálicos (Chen et al., 2019; Hu et al., 2014; Sun et al., 2016; Wang et al., 2017; Zhao et al., 2018), explosivos derivados de nitroaromáticos (Guo et al., 2013; He et al., 2012; Lan et al., 2009), compuestos orgánicos volátiles (Li et al., 2017; Zhang et al., 2016), aminoácidos (Chen et al., 2017; Hu et al., 2016; Zhang et al., 2015), gases contaminantes (Li et al., 2014) y antibióticos (Hu et al., 2015; Sun et al., 2018; Zhao et al., 2019). Sin embargo, los ejemplos de sensores basados en Zn(II)-MOF para la detección de pesticidas comunes siguen siendo relativamente escasos en comparación con los analitos mencionados previamente. Destacan casos como la detección de paratión (Singha et al., 2017), azinphos-metilo (Singha et al., 2018; Singha et al., 2017), 2,6-dicloro-4-nitroanilina (DCN) (Wang et al., 2019), paratión-metilo (Li et al., 2021; Weng

et al., 2021), acefato (Li et al., 2021) y clorpirifos (Li et al., 2021) en muestras reales.

A pesar de los avances, parámetros analíticos como la intensidad de la respuesta luminiscente y la sensibilidad en matrices complejas siguen siendo un desafío central. En este sentido, la estabilidad acuosa de los Zn(II)- MOF es crucial, ya que un material estable en agua mantiene su estructura cristalina y sus propiedades espectroscópicas tras la exposición prolongada a medios acuosos. Esta estabilidad se evalúa experimentalmente mediante técnicas como la espectroscopía de fluorescencia, la espectroscopía Raman, la espectroscopía infrarroja, la espectroscopía fotoelectrónica de rayos X y la difracción de rayos X en polvo (Hu et al., 2013; Zhao et al., 2018).

Desde el punto de vista termodinámico, la resistencia a la hidrólisis depende de la energía libre de Gibbs asociada a los enlaces metal-ligante. La fortaleza del enlace de coordinación entre el ion Zn(II) y los ligantes orgánicos es un indicador clave de la estabilidad del complejo. Aunque estos enlaces suelen ser menos robustos que los presentes en materiales naturales como las zeolitas aluminosilicáticas (Zhao et al., 2018), el diseño de ligantes aromáticos multicarboxilatos y donadores de nitrógeno ha permitido superar parcialmente las altas energías de hidratación del Zn(II) ($-\Delta G^\circ \approx 2040$ $kJ \cdot mol^{-1}$) (Rosales-Vázquez et al., 2021), sobre todo cuando se incorporan moléculas de agua en su estructura o se emplean ligantes de carácter hidrofóbico.

Desde el punto de vista del diseño de ligantes, la estrategia más efectiva para conferir estabilidad hidrolítica a los Zn(II)-MOF ha sido la incorporación de ligantes aromáticos multicarboxilato en combinación con grupos donadores de nitrógeno (particularmente piridinas, imidazoles, triazoles). Esta combinación favorece enlaces de coordinación más robustos mediante el efecto quelato y reduce la labilidad del centro metálico frente al ataque nucleófilo del agua. Otro aspecto común demostrado en sistemas recientes es que durante el proceso de síntesis el medio de reacción involucra agua, que puede estar presente en el producto final de la estructura, como moléculas de coordinación o de cristalización, confiriendo la estabilidad hidrolítica buscada y que se detalla en los ejemplos a mencionar en la sección 2.

1.2 Procesos de emisión

En la mayoría de los MOF basados en Zn(II), la emisión dominante proviene de procesos intraligante y de transferencias de carga, generando señales

intensas en la región visible (390–520 nm), típicamente de azul a verde (Hasegawa & Kitagawa, 2022; Wang et al., 2019; Zhao et al., 2018). Estos fenómenos permiten respuestas rápidas, con tiempos de vida del orden de nanosegundos (Hu et al., 2013), y, además, son reproducibles, lo que resulta ideal para aplicaciones de sensado en tiempo real.

En consonancia con su estabilidad estructural, las unidades fotoactivas suelen ser los mismos ácidos carboxílicos polidentados aromáticos con transiciones de tipo π-π, acompañados de ligantes con grupos donadores de nitrógeno. Los ligantes por sí mismos suelen presentar un amplio grado de emisión: comúnmente baja para los anillos aromáticos de seis miembros (benceno y piridinas sustituidas) y mediana-alta para los anillos de cinco miembros y los anillos fusionados (imidazol, naftaleno, quinolinas sustituidas) (Chen et al., 2025). Independientemente del grado de emisión particular de cada ligante, es común que exhiban un incremento de sus propiedades fluorescentes en el momento en el que son coordinados y fijados al ion metálico de Zn(II) (Rosales-Vázquez et al., 2021).

La respuesta de la fluorescencia en los Zn(II)- MOF suele estar regulada por mecanismos que constituyen la base de la señal analítica ante la presencia de los pesticidas (Singha et al., 2018; Singha et al., 2017). El apagado de fluorescencia (turn-off) es la respuesta más frecuente en los Zn(II)- MOF frente a los agroquímicos y se origina principalmente por tres mecanismos: (a) la transferencia electrónica fotoinducida (PET), (b) el efecto de filtro interno (IFE) y (c) interacciones π-π o enlaces de hidrógeno que alteran la conformación del ligante. Ejemplos de la disminución de la fluorescencia atribuida a estos mecanismos se describen en los sistemas de la sección 2.

1.3 Selectividad

En el caso de los MOF luminiscentes basados en Zn(II), la interacción específica entre el pesticida y los sitios activos del marco puede inducir variaciones detectables en la intensidad o la longitud de onda de la emisión, lo que permite realizar análisis cuantitativos directos y sensibles (Singha et al., 2018; Singha et al., 2017). Estos materiales, además, ofrecen una notable versatilidad sintética, que permite una amplia gama de modificaciones en los ligantes y variaciones derivadas del tipo de ruta sintética elegida, las cuales repercuten en la geometría de coordinación, los modos de conectividad, el volumen de poro y los disolventes de cristalización, entre otros aspectos (Zhao et al., 2018).

La selectividad de los Zn(II)-MOF para pesticidas específicos depende principalmente de dos factores: los grupos funcionales presentes en los ligantes y las cavidades que el MOF podría exhibir. En cuanto a los grupos funcionales, es común que aquellos ligantes que incorporan grupos amino (-NH_2), hidroxilo (-OH) o piridilo libre hayan demostrado mayor afinidad por pesticidas con grupos nitro o catiónicos debido a sus interacciones directas con dichos grupos funcionales mediante enlaces de hidrógeno (Liu et al., 2024; Su et al., 2021). Por su parte, los sistemas con ligantes multicarboxilato y anillos de cinco miembros con nitrógeno, como los imidazoles y triazoles, aportan sitios básicos de Lewis capaces de interactuar con pesticidas catiónicos como el diquat (Liu et al., 2024). En lo concerniente al tamaño y la forma de las cavidades porosas, las que presentan dimensiones complementarias al volumen molecular del pesticida objetivo favorecen el reconocimiento por exclusión de tamaño y maximizan las interacciones de contacto útil, reduciendo así la respuesta frente a interferentes de mayor o menor volumen molecular. Esta complementariedad geométrica, combinada con la funcionalidad química de los ligantes, constituye la base del diseño racional de Zn(II)-MOF altamente selectivos para agentes contaminantes específicos en matrices ambientales complejas (Rosales-Vázquez et al., 2021; Zhao et al., 2018). Gracias a esta capacidad de personalización, estos materiales se perfilan como plataformas altamente prometedoras para el desarrollo de sensores ópticos selectivos, reproducibles y eficaces para la detección de pesticidas en matrices acuosas reales (Hasegawa & Kitagawa, 2022; Wang et al., 2019). En la siguiente sección se exhiben ejemplos selectos que ilustran cómo estos sistemas se han aplicado con éxito como herramientas analíticas, destacando la relación entre el diseño estructural y la respuesta luminiscente frente a pesticidas de uso común.

2. MOF DE ZN(II) COMO AGENTES FLUORESCENTES EN LA DETECCIÓN DE PESTICIDAS EN MEDIOS ACUOSOS

Fan et al. desarrollaron el NUC-6=$[Zn(tptc)_{0.5}(bimb)]\cdot H_2O_n$, sistema diseñado para mejorar la estabilidad química en medios acuosos mediante la combinación del ligante aromático H_4tptc (p-terfeniltetracarboxílico) y el puente flexible bimb (1,3-bis(imidazol-1-ilmetil)benceno). El uso propuesto de los ligantes responde a los postulados de la elección de ácidos

multicarboxílicos aromáticos, y la incorporación de unidades luminiscentes como el imidazol, además de que su síntesis se realiza en medio acuoso y, como resultado, el agua permanece en la estructura como molécula de cristalización, favoreciendo su hidroestabilidad (Fan et al., 2020). La estructura cristalina adopta una red tridimensional interpenetrada (4,4)-c que brinda alta resistencia frente a variaciones de pH y a diferentes disolventes orgánicos. El compuesto exhibe una emisión azul intensa a 392 nm, atribuida a procesos de emisión centrados en el ligante derivado de imidazol.

En pruebas de detección de varios pesticidas, el MOF demostró una selectividad específica para el pesticida organoclorado 2,6-dicloro-4-nitroanilina (DCN), atribuida al contacto de la red con interacciones débiles de tipo van der Waals, lo que provocó un marcado apagado de la fluorescencia (figura 3). El límite de detección alcanzado fue de 117 ppb, con una constante de Stern-Volmer de 4.51×10^4 M^{-1}. También se realizaron investigaciones acerca del mecanismo de sensado, en el que se propone la combinación de efecto de filtro interno (IFE) y la transferencia electrónica fotoinducida (PET), respaldadas por cálculos de orbitales HOMO-LUMO. En general, el material demostró buena selectividad frente a interferentes y capacidad de reutilización tras varios ciclos, consolidándose como un sensor luminiscente robusto para pesticidas y antibióticos en agua (Fan et al., 2020).

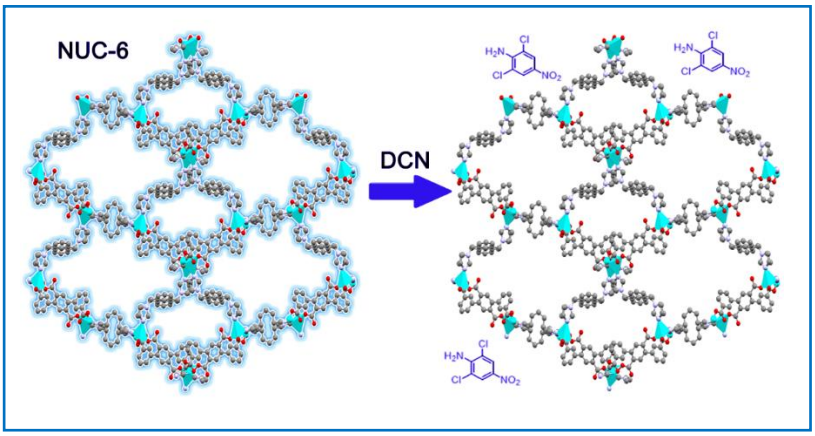


Figura 3. Representación simplificada de la red luminiscente del NUC-6 y el apagamiento tras su contacto con el pesticida DCN.

El NUC-6 es un ejemplo de sensado que parte únicamente de la emisión inherente del MOF y cuya estructura reticular es la responsable de interactuar con el huésped. En cambio, existen otros tipos de interacciones como las que Zhang et al. desarrollaron en el sistema Zn-CPTA = $[Zn_4(CPTA)_2(\mu_3\text{-}OH)_2(H_2O)(DMF)_{0.5}]\cdot 1.5H_2O$, construido con el ligante H_3CPTA (ácido 5-(4-

carboxifenil)-1H-1,2,4-triazol) (Zhang et al., 2022). Para esta red tridimensional, la estructura cristalina se compone de unidades secundarias Zn-O-Zn con conectividad μ_3-OH, formando canales unidimensionales decorados con oxígenos carboxilato que actúan como sitios activos de interacción. Nuevamente, el uso del agua como disolvente de reacción brindó estabilidad adicional al sistema. El material exhibió una emisión centrada en 375 nm, atribuida a procesos de emisión del ligante derivado de triazol.

En pruebas de detección, se observó un marcado apagado de la fluorescencia frente a los pesticidas nitenpyram (NTP) y nitrofurazona (NFZ), con límites de detección de 0.625 μM y 0.126 μM, respectivamente. El mecanismo de reconocimiento se explicó mediante interacciones π-π y enlaces de hidrógeno entre los ligantes aromáticos y los pesticidas. El sensor fue validado en agua de riego, lago y río, mostrando recuperaciones superiores al 90 % y una buena estabilidad tras varios ciclos de uso, consolidándose como un sensor robusto para el monitoreo de pesticidas en aguas naturales (Zhang et al., 2022).

En otro interesante enfoque, Su et al. (2021) utilizaron el MOF $[Zn(TPYBDC)\cdot H_2O]_n$, cuya estructura mostró que el ligando también presentaba piridinas no coordinadas, que brindaron la característica de actuar como sitios activos de reconocimiento molecular (figura 4), mediante una estructura supramolecular 2D en capas (Su et al., 2021). Como se ha demostrado en los ejemplos previos, la síntesis en agua que repercute en las moléculas de cristalización confiere estabilidad adicional en medios acuosos. El material, además, mostró una emisión intensa al ser excitado a 290 nm y, gracias a la presencia de los grupos donadores de electrones, respondió con un marcado apagado de la fluorescencia frente a pesticidas neonicotinoides con grupo nitro, como imidacloprid, dinotefuran y nitenpiram, alcanzando eficiencias de apagado superiores al 50 % (Su et al., 2021; Wang et al., 2019).

A pesar de que no se observó buena selectividad, los límites de detección fueron satisfactorios, con valores de 0.562 μM, 0.247 μM y 0.441 μM para imidacloprid, dinotefuran y nitenpiram, respectivamente, valores inferiores a los máximos residuos permitidos en alimentos por la Unión Europea y mejores que los de otros métodos electroquímicos o basados en nanomateriales reportados previamente (Zhao et al., 2018). Además, el sensor se utilizó en varios ciclos, demostrando recuperaciones entre 94 y 115 % en muestras simuladas de agua agrícola, lo que confirma su aplicabilidad práctica. La

combinación de estructura laminar, estabilidad en medios acuosos y su sensibilidad analítica convierte a este MOF en una plataforma prometedora para la detección de pesticidas en medios acuosos reales (Su et al., 2021).

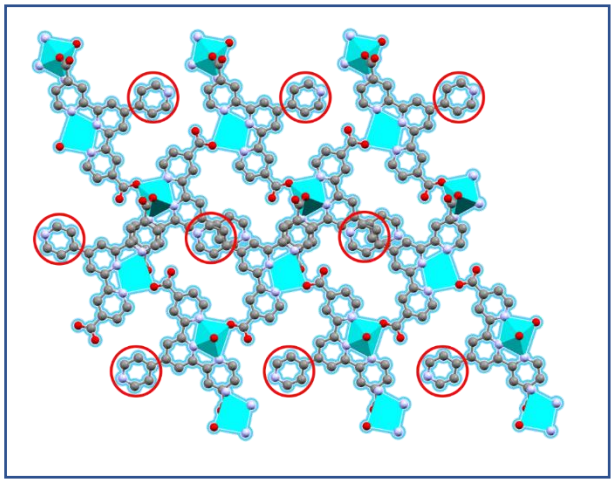


Figura 4. Identificación de los sitios de reconocimiento molecular en la red de MOF $[Zn(TPYBDC)\cdot H_2O]_n$ para el sensado de imidacloprid, dinotefuran y nitenpiram. El círculo rojo señala las piridinas no coordinadas del ligante TPYBDC, que actúan como sitios activos de unión de los pesticidas neonicotinoides.

Estructuras más complejas también han sido propuestas; por ejemplo, el diseño secuencial planeado por Liu et al. (2024) en un sistema híbrido denominado RhB@ZnMOF = $\{[Zn(TATB)(bimb)]\cdot H_2O\}_n$ + RhB buscó combinar la robustez estructural de un MOF con la capacidad de señal ratiométrica de un fluoróforo huésped (Liu et al., 2024). La red cristalina se construyó a partir del ligante H_3TATB (ácido 4,4′,4″-(1,3,5-triazina-2,4,6-triil)tribenzoico), que aporta cavidades rígidas y altamente conjugadas, y del puente flexible bimb (1,3-bis(imidazol-1-ilmetil)benceno), que confiere conectividad tridimensional. Por sí misma, la elección de los ligantes brinda emisión al MOF, y su síntesis en agua, le confiere estabilidad en dicho medio. Sin embargo, la innovación consistió en incorporar rodamina B (RhB) en las cavidades del MOF, lo que generó un sistema huésped-anfitrión capaz de responder de manera dual a estímulos externos.

El material exhibió dos emisiones características (figura 5): una azul intensa, atribuida a las propiedades innatas del MOF (~356 nm), y otra roja, correspondiente al huésped RhB (~580 nm). Frente al herbicida diquat (DQ), se observó un marcado apagado de la emisión roja (IFE) acompañado de una intensificación de la emisión azul (FRET), lo que permitió establecer un mecanismo ratiométrico de detección altamente sensible (Liu et al., 2024; Zhao et al., 2018). El límite de detección calculado fue de 10.5 nM, valor significativamente inferior a los máximos residuos permitidos en agua potable.

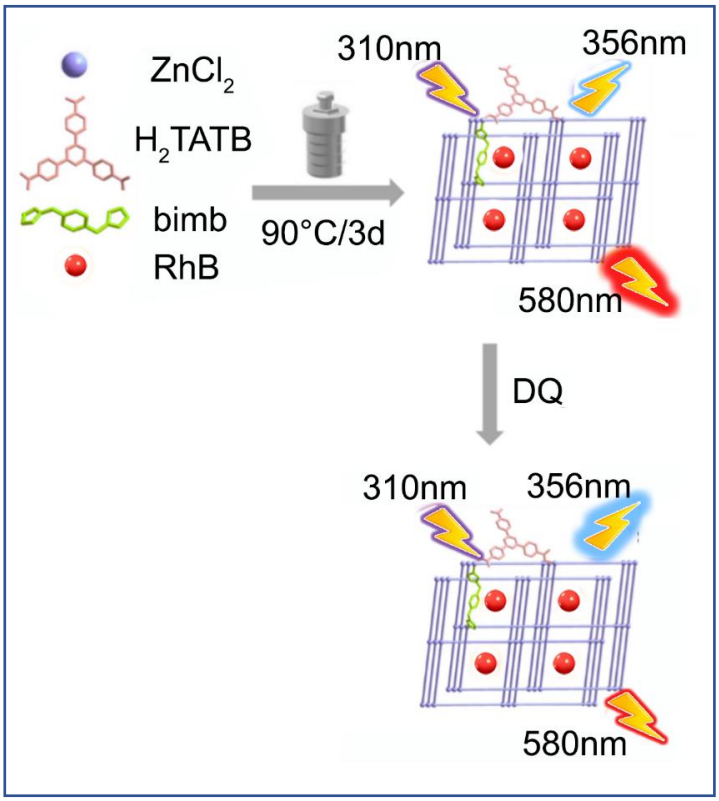


Figura 5. Representación del diseño secuencial del sistema $\{[Zn(TATB)(bimb)]\cdot H_2O\}_n$ (Liu et al., 2024).

El sensor fue validado en agua de grifo y en extractos de manzana, mostrando recuperaciones superiores al 95 % y una excelente selectividad frente a interferentes comunes, como otros herbicidas y compuestos orgánicos presentes en matrices vegetales. El estudio del mecanismo de respuesta indicó que la combinación del efecto de filtro interno (IFE) y la transferencia de energía por resonancia de Förster (FRET) era responsable de la señal dual, respaldada por cálculos de orbitales HOMO-LUMO y por espectros de absorción comparativos (Hasegawa & Kitagawa, 2022). La combinación de cavidades rígidas, huésped fluorescente y respuesta dual convierte este sistema en un sensor luminiscente de nueva generación, capaz de detectar herbicidas catiónicos con gran sensibilidad y aplicabilidad práctica en muestras reales de agua y de alimentos.

Continuando bajo esta vertiente para integrar arquitecturas jerárquicas, Chen et al. diseñaron el hidrogel compuesto ZIF-8 en Zn2@SA, donde se combinaron dos MOF: Zn1 = $\{[Zn(tpt)_2\cdot 2H_2O]\}_n$ y Zn2 = $\{[Zn_2(tpt)_2(bdc)]\}_n$, recubiertos con ZIF-8 y soportados en alginato de sodio (SA) (Chen et al.,

2022). La estructura resultante es tridimensional, con porosidad y buena estabilidad frente a disolventes. El material mostró fluorescencia azul-violeta (450 nm) y un marcado apagado de la fluorescencia frente al fungicida metil-tiofanato (TM), con un límite de detección de 0.14 μM. Además, demostró capacidad de remoción del pesticida carbendazim (CBZ) (figura 6), alcanzando una adsorción de 161.8 mg g^{-1}, muy superior a la de fibras comerciales (Chen et al., 2022; Zhao et al., 2018). El sistema fue validado en frutas, vegetales y agua, mostrando alta selectividad y estabilidad tras múltiples ciclos.

El estudio de los cuatro casos presentados permite englobar de forma general en qué consisten las vertientes en el desarrollo de MOF luminiscentes de Zn(II)

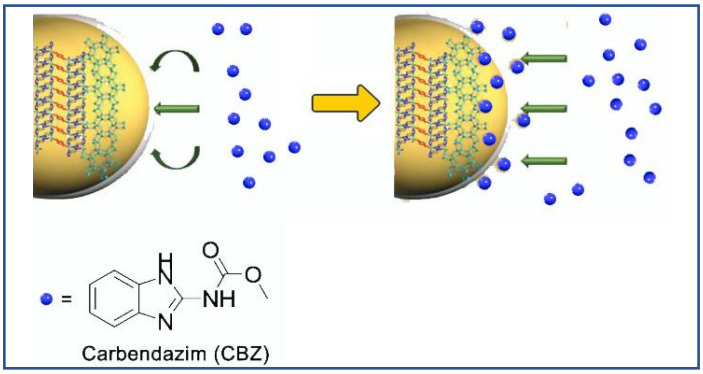


Figura 6. Propuesta del mecanismo de adsorción del pesticida carbendazim por el sistema ZIF-8 en Zn2@SA (imagen modificada de la referencia Chen et al., 2022).

para su aplicación en la detección de pesticidas: 1) partiendo de interacciones débiles de tipo van der Waals directamente con la red, aún en un sistema interpenetrado; 2) a través de interacciones específicas con los grupos funcionales de los ligantes, tales como enlaces de hidrógeno, interacciones π-π o contactos electrostáticos con sitios coordinativamente no saturados o piridinas libres que complementan la geometría del analito; 3) mediante el diseño de receptores del tipo desplazamiento de unidad fluorescente, en el que un fluoróforo huésped con emisión propia se aloja en las cavidades del MOF y su interacción con el pesticida genera una respuesta ratiométrica dual; y, finalmente, 4) en arquitecturas jerárquicas más complejas, como hidrogeles o compositos, que al encapsular o soportar la red favorecen la intensidad de la emisión fluorescente por confinamiento e incrementan la selectividad al restringir el acceso al analito a través de la matriz portadora (Hasegawa & Kitagawa, 2022). La tabla 1 reúne ejemplos adicionales de MOF de Zn(II) descritos en la literatura, destacando sus propiedades y desempeño como sensores fluorescentes frente a pesticidas.

Tabla 1. Sensores fluorescentes Zn(II)- MOF para pesticidas y herbicidas en muestras reales

Fórmula	Respuesta	Pesticida /herbicida	Muestra	λ_{em} (nm)	LOD (M o μM)	Ref.
$\{[Zn(tptc)_{0.5}(bimb)]\cdot H_2O\}_n$ = NUC-6	Apagado	DCN; NFZ; NFT	Agua de río, grifo, extractos vegetales	392	DCN: 4.7×10^{-7} NFZ: 1.1×10^{-7} NFT: 8.0×10^{-8}	(Fan et al., 2020)
$[Zn(TPYBDC)\cdot H_2O]_n$	Apagado	Imidaclo-prid; Dinotefu-ran; Nitenpi-ram	Agua de río, grifo, embotellada	290	0.562; 0.247; 0.441 μM	(Su et al., 2021)
$\{[Zn(H_2L)(H_2O)_2]\cdot H_2O\}_n$	Apagado	TMTD	Agua simulada	359	0.76 μM	(Singha et al., 2018)
RhB@Zn- MOF $\{[Zn(TATB)(bimb)]\cdot H_2O\}_n$ + RhB	Ratiométrico (IFE+FRET)	Diquat (DQ)	Agua de grifo, extractos de manzana	356 / 580	10.5 nM	(Liu et al., 2024)
$[Zn_4(CPTA)_2(\mu_3\text{-}OH)_2\ (H_2O)(DMF)_{0.5}]\cdot 1.5H_2O$	Apagado	Nitenpyram; Nitrofura-zona	Agua de riego, lago, río	375	0.625 μM; 0.126 μM	(Zhang et al., 2022)
ZIF-8-Zn2@SA	Apagado	Metil-tiofanato y remoción CBZ	Frutas, vegetales, agua	~450	TM: 0.14 μM CBZ: 161.8 mg g^{-1}	(Chen et al., 2022)
Zn-DBC	Apagado	Paraquat; Diquat	Agua	420	DQ: 2.8 ppm	(He et al., 2012)
CP-1 = $[Zn(PTA)(DTP)(H_2O)_2]\cdot$DMF; CP-2 = $[Zn(BTC)(DTP)]\cdot(CH_3CN)_{1.5}\cdot(H_2O)_4$	Apagado	CP-1: Metami-tron; CP-2: Imidaclo-prid	Agua	322	1.61×10^{-7}; 2.51×10^{-7}	(Singha et al., 2017)
H-ZIF-8@Zn- MOF -74	Adsorción	Clorotalo-nil, Tebuco-nazol, Clorpyri-fos, Butralin, Deltame-trin, Pyrida-ben	Té y aguas residuales	—	0.021–0.422 μM	(Zhang et al., 2021)
$[Zn_3(DDB)(DPE)]$	Apagado	DCN	Extractos de zanahoria, nectarinas y uvas	450	2.7×10^{-7} M	(Wang et al., 2019)
$Ru(bpy)_3$@ZIF-90-MnO_2	Apagado	Metil-paration	Agua de grifo, lago; extractos de col	600	1.40×10^{-10}M	(Li et al., 2021)
AuNCs@ZIF-8	Encendido	Acefato	Agua de grifo y lago, extracto de lechuga	600	3.66×10^{-9}	(Zhang et al., 2021)
CBZ-BOD@ZIF-8	Encendido	Clorpyri-fos	Células vivas	624	1.6×10^{-7}	(Shen et al., 2021)
1@PMMA (Zn- MOF en membrana de PMMA)	Apagado	ODZ; DCN	Alimentos	—	n.r.	(Gao et al., 2024)

Nota: H_4tptc = ácido p-terphenyl-2,2″,5″,5‴-tetracarboxílico; bimb = 1,3-bis(1-imidazol-1-ilmetil)benzeno; H_2TPYBDC = ácido 4′-(piridin-4-il)-[2,2′:6′,2″-terpiridina]-4,4″-dicarboxílico; H_4L = 3,5-bis(3′,5′-dicarboxifenil)-1H-1,2,4-triazol; H_3TATB = ácido 4,4′,4″-(1,3,5-triazina-

2,4,6-triil)tribenzoico; CPTA = ácido 5-(4-carboxifenil)-1H-1,2,4-triazol; Htpt = ácido 2,4,6-tris(4-piridil)-1,3,5-triazina; H_2bdc = ácido tereftálico; SA = alginato de sodio; H_4DBC = ácido 2,7,10,15-tetrakis[2,6-dimetil-4-(α-carboxi)metoxifenil]dibenzo[g,p]criseno; PTA = ácido tereftálico; BTC = ácido benceno-1,3,5-tricarboxílico; DTP = 3,5-di(1,2,4-triazol-1-il)piridina; NTD = ácido naftaleno-1,4-dicarboxílico; DOBDC = ácido 2,5-dihidroxitereftálico; DDB = ácido 3,5-di(2′,4′-dicarboxifenil)benzoico; DPE = 1,2-di(4-piridil)etileno; bpy = 2,2′-bipiridina; CBZ-BOD = derivado carbazol-boradiaza aromático; PMMA = Polimetil metacrilato, ODZ = Ornidazol.

CONCLUSIONES

El análisis de las redes luminiscentes centradas en Zn(II) permite reconocer la versatilidad y el potencial de estas arquitecturas para la detección fluorescente de pesticidas y herbicidas en medios acuosos reales. A lo largo de los ejemplos revisados, se ha evidenciado que la estabilidad química, la naturaleza de los ligantes y la posibilidad de incorporar huéspedes fluorescentes son factores determinantes para obtener respuestas analíticas reproducibles y altamente sensibles. Además, estos mof representan algunos prototipos de varias alternativas para alcanzar la selectividad mediante diferentes estrategias: desde interacciones débiles de la red, aprovechando contactos directos con los ligantes, hasta mecanismos más complejos que involucran transferencia de energía o sistemas huésped-anfitrión con una respuesta dual. Esta diversidad de enfoques confirma que los mof de Zn(II) constituyen plataformas flexibles, capaces de adaptarse a distintos analitos y condiciones de matriz, sin perder estabilidad ni capacidad de reutilización.

En cuanto a su aplicabilidad, los límites de detección alcanzados en varios de los mof estudiados se sitúan por debajo de los valores máximos permitidos por las normativas internacionales, lo que refuerza su uso práctico en el monitoreo de agua, alimentos y ambientes agrícolas. La posibilidad de validar estos sensores en muestras reales, con recuperaciones superiores al 90 %, consolida su papel como herramientas analíticas competitiva frente a técnicas convencionales más costosas y menos accesibles.

En conjunto, los avances revisados demuestran que los mof luminiscentes de Zn(II) representan una vertiente emergente y prometedora en el control de contaminantes, ofreciendo soluciones sostenibles y eficientes para la detección de pesticidas y herbicidas. Su desarrollo futuro dependerá de la optimización de la selectividad, la integración de arquitecturas jerárquicas y la exploración

de nuevos ligantes funcionales, con el objetivo de consolidar su impacto en la protección ambiental y la seguridad alimentaria.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT) el apoyo económico otorgado para la realización de este proyecto de investigación a través del Programa "Investigadoras e Investigadores COMECYT 2025", con el folio CAT2025-0066, para la estancia de investigación de LDRV.

REFERENCIAS

Aktar, M. W., Sengupta, D., & Chowdhury, A. (2009). Impact of pesticides use in agriculture: their benefits and hazards. *Interdisciplinary Toxicology, 2*(1): 1-12. https://doi.org/10.2478/v10102-009-0001-7

Bhattacharya, R., Chattopadhyay, M. K., Datta, S., & Banerjee, P. (2025). Metal–Organic Frameworks in Action: A Comprehensive Review on Fluoremetric Sensing and Adsorption of Organophosphorus Pesticides. *ChemistrySelect, 10*(28): e202501815. https://doi.org/10.1002/slct.202501815

Carvalho, F. P. (2017). Pesticides, environment, and food safety. *Food and Energy Security, 6*(2): 48-60. https://doi.org/10.1002/fes3.108

Chauhan, A., Chauhan, V., & Goyal, P. (2017). Pesticide residue analysis in food samples using chromatography techniques. *Journal of Analytical Science and Technology, 8*(1): 1-9. https://doi.org/10.1186/s40543-017-0120-5

Chen, P., Jia, L., Wang, K., & Wang, F. (2025). Fluorescent chemogenetic tags: ligand design and biological applications. *Coordination Chemistry Reviews*, 545:217031 https://doi.org/10.1016/j.ccr.2025.217031

Chen, L., Liu, M., Zhang, Y., Qin, J., & Wen, T. (2022). Hierarchical Zn(II) mof hydrogel composites for luminescent sensing and removal of pesticides in water and food. Small, 18(45): 2203456. https://doi.org/10.1002/smll.202203456

Damalas, C. A., & Eleftherohorinos, I. G. (2011). Pesticide exposure, safety issues, and risk assessment indicators. International *Journal of Environmental Research and Public Health, 8*(5): 1402-1419. https://doi.org/10.3390/ijerph8051402

Fan, L., Wang, X., Ge, J., Li, F., Wang, L., Wang, S., Chen, S., & Wang, S. (2020). A water stable Zn(II) mof for selective luminescent sensing of pesticides and antibiotics. *Applied Organometallic Chemistry, 34*(5): e5587. https://doi.org/10.1002/aoc.5587

Gao, X., Liu, M., Lei, M., Kong, Y., Xu, X., & Zhang, Q. (2024). A Zn- mof -based mixed matrix membrane as an ultrastable luminescent sensor for selective and visual detection of antibiotics and pesticides in food samples. Talanta, 277: 126303. https://doi.org/10.1016/j.talanta.2024.126303

Guo, Z., Xiao, H., & Bu, X. (2013). Luminescent Zn(II) mof s for sensing nitroaromatic explosives. *Chemical Communications, 49*(80): 9133-9135. https://doi.org/10.1039/c3cc45356a

Hasegawa, Y., & Kitagawa, Y. (2022). Luminescent lanthanide coordination polymers with transformative energy transfer processes for physical and chemical sensing applications. Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews, 51: 100485. https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2022.100485

He, C., Liu, D., & Lin, W. (2012). Luminescent metal-organic frameworks for sensing applications. Chemical Society Reviews, 41(8): 3029-3050. https://doi.org/10.1039/c1cs15197e

Hernández, F., Sancho, J. V., Ibáñez, M., Abad, E., Portolés, T., & Mattioli, L. (2013). Current use of high-resolution mass spectrometry in the environmental sciences. *Analytical and Bioanalytical Chemistry, 405*(17): 5005-5017. *https://doi.org/10.1007/s00216-013-6858-7*

Hu, Z., Deibert, B. J., & Li, J. (2013). Luminescent metal-organic frameworks for chemical sensing. *Chemical Society Reviews, 43*(16): 5815-5840. https://doi.org/10.1039/c3cs60475f

Li, J., Weng, Y., Shen, C., Luo, J., Yu, D., & Cao, Z. (2021). Sensitive fluorescence and visual detection of organophosphorus pesticides with a $Ru(bpy)_3^{2+}$ ZIF-90 MnO_2 sensing platform. *Analytical Methods, 13*(26): 2981-2988. https://doi.org/10.1039/D1AY00841B

Liu, J., Zhang, Y., Wang, H., Li, Q., & Chen, W. (2024). Rhodamine B encapsulated Zn(II) mof as a ratiometric luminescent sensor for bipyridinium herbicides. *Microchemical Journal, 192*: 109873. https://doi.org/10.1016/j.microc.2023.109873

Lozowicka, B. (2015). Health risk for children and adults consuming apples with pesticide residues in Poland. *Environmental Science and Pollution Research, 22*(14): 11234-11247. https://doi.org/10.1007/s11356-015-4337-9

Mandal, S., Singha, D. K., Majee, P., Mondal, S. K., & Mahata, P. (2018). Detection of pesticides in aqueous medium and fruit extracts using a three dimensional metal-organic framework: experimental and computational study. Inorganic Chemistry, 57(19): 12155-12165. https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.8b01767

Mnif, W., Hassine, A. I. H., Bouaziz, A., Bartegi, A., Thomas, O., & Roig, B. (2011). Effect of endocrine disruptor pesticides: a review. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 8*(6): 2265-2303. https://doi.org/10.3390/ijerph8062265

Mostafalou, S., & Abdollahi, M. (2013). Pesticides and human chronic diseases: evidences, mechanisms, and perspectives. *Toxicology and Applied Pharmacology, 268*(2): 157-177. https://doi.org/10.1016/j.taap.2013.01.025

Pimentel, D. (1995). Amounts of pesticides reaching target pests: environmental impacts and ethics. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics, 8*(1): 17-29. https://doi.org/10.1007/BF02349034

Popp, J., Pető, K., & Nagy, J. (2013). Pesticide productivity and food security. *Agricultural Economics, 44*(3): 1-12. https://doi.org/10.1111/agec.12027

Rosales-Vázquez, L. D., Dorazco-González, A., & Sánchez-Mendieta, V. (2021). Efficient chemosensors for toxic pollutants based on photoluminescent Zn(II) and Cd(II) metal-organic networks. Dalton Transactions, 50(13): 4465-4478. https://doi.org/10.1039/D0DT04403B

Singha, D. K., Majee, P., Mondal, S. K., & Mahata, P. (2017). Highly selective aqueous phase detection of azinphos methyl pesticide in ppb level using a cage connected 3D mof. *ChemistrySelect, 2*(20): 5760-5768. https://doi.org/10.1002/slct.201700963

Shen, B., Ma, C., Ji, Y., Dai, J., Li, B., Zhang, X., & Huang, H. (2021). Detection of carboxylesterase 1 and chlorpyrifos with ZIF-8 metal-organic frameworks using a red emission BODIPY based probe. *ACS Applied Materials & Interfaces, 13*(7): 8718-8726. https://doi.org/10.1021/acsami.0c19811

Su, B., Zhao, W., Li, D., Xiao, H., & Wen, W. (2021). A two dimensional Zn(II) mof with uncoordinated pyridyl sites for selective sensing of neonicotinoid pesticides. *Analytical Methods, 13*(12): 1456-1464. https://doi.org/10.1039/D0AY02234H

Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & Befort, B. L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 108*(50): 20260-20264. https://doi.org/10.1073/pnas.1116437108

Wang, X., Feng, D., Tang, J., Zhao, Y., Li, J., Yang, J., Kim, C. K., & Su, F. (2019). A water stable zinc(II) organic framework as a multiresponsive luminescent sensor for toxic heavy metal cations, oxyanions and organochlorine pesticides in aqueous solution. *Dalton Transactions, 48*(44): 16776-16785. https://doi.org/10.1039/c9dt03195b

Zhang, W., Ye, G., Liao, D., Chen, X., Lu, C., Esmaeilzadeh-Salestani, K., Parsaee, Z., & Khatami, M. (2021). Luminescent Au nanoclusters encapsulated in ZIF-8 as a selective sensor for acephate in water and vegetable extracts. Analytical Methods, 13(37): 4219-4226. https://doi.org/10.1039/D1AY01129F

Zhang, W., Hu, Y., Liang, X., & Liu, S. (2022). A Zn(II) triazole mof as a luminescent sensor for nitrofurazone and nitenpyram in water. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 70*(12): 3562-3571. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c07845

Zhao, X., Bu, X., Wu, T., Zheng, S. T., Wang, L., & Feng, P. (2018). Selective anion exchange with nanogated isoreticular positive metal-organic frameworks. *Coordination Chemistry Reviews, 376*: 229-249. https://doi.org/10.1016/j.ccr.2018.08.002

REVISIÓN

DE LA ETNOBOTÁNICA A LA NANOTECNOLOGÍA: ASTERACEAE COMO RECURSO ESTRATÉGICO PARA LA INNOVACIÓN

FROM ETHNOBOTANY TO NANOTECHNOLOGY: ASTERACEAE AS A STRATEGIC RESOURCE FOR INNOVATION

GARCÍA CONDE, Karen Berenice[1]

CASTAÑEDA FACIO, Adalí Oliva[1]

VARGAS SEGURA, Alejandra Isabel[2]

SÁENZ GALINDO, Aidé[1]

RESUMEN

México es un país megadiverso con una gran riqueza botánica; entre sus grupos vegetales de interés destaca la familia Asteraceae, por su abundancia y su empleo en la medicina tradicional. Esta revisión analiza el potencial de las Asteraceae como fuente de compuestos bioactivos para aplicaciones nanotecnológicas, considerando su diversidad fitoquímica, que incluye flavonoides, terpenoides, lactonas sesquiterpénicas y ácidos fenólicos con actividades antioxidantes, antiinflamatorias y antimicrobianas. Asimismo, se examinan las limitaciones de los extractos vegetales convencionales—inestabilidad, baja solubilidad y biodisponibilidad variable— y el aporte potencial de sistemas de nanoencapsulación, como nanoemulsiones, síntesis vesicular y nanopartículas. Finalmente, se discuten aplicaciones potenciales en biomedicina, alimentos, cosmética y biorremediación, así como los principales retos de estandarización, escalamiento y evaluación toxicológica.

Palabras clave: Asteraceae; compuestos bioactivos; nanotecnología; nanoencapsulación; medicina tradicional; etnobotánica.

1. Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila. Saltillo, Coahuila, México.
2. Facultad de Odontología, Universidad Autónoma de Coahuila. Saltillo, Coahuila, México.

ABSTRACT

Mexico is a megadiverse country with a wealth of botanical resources; among its plant groups of interest, the Asteraceae family stands out due to its abundance and its use in traditional medicine. This review analyzes the potential of the Asteraceae as a source of bioactive compounds for nanotechnological applications, considering their phytochemical diversity, which includes flavonoids, terpenoids, sesquiterpene lactones, and phenolic acids with antioxidant, anti-inflammatory, and antimicrobial activities. It also

Correspondencia
karengarciaconde@uadec.edu.mx
https://orcid.org/0000-0002-1207-2242
Fecha de recepción
2 de junio de 2026.
Fecha de aceptación
26 de septiembre de 2026.

examines the limitations of conventional plant extracts—instability, low solubility, and variable bioavailability—and the potential contribution of nanoencapsulation systems, such as nanoemulsions, vesicular synthesis, and nanoparticles. Finally, potential applications in biomedicine, food, cosmetics, and bioremediation are discussed, as well as the main challenges related to standardization, scale-up, and toxicological evaluation.

Keywords: *Asteraceae; bioactive compounds; nanotechnology; nanoencapsulation; traditional medicine; ethnobotany.*

INTRODUCCIÓN

La ubicación latitudinal y la compleja topografía de México generan una marcada heterogeneidad ambiental que favorece la presencia de múltiples hábitats y una elevada diversidad biológica (Guzmán Gallardo, 2025). Esta diversidad de condiciones ecológicas ha posicionado al país entre los territorios con mayor biodiversidad, ocupando el cuarto lugar a nivel mundial (Salinas-Rodríguez et al., 2018).

Una fracción importante de la biodiversidad nacional corresponde a las plantas vasculares: se han estimado alrededor de 23,314 especies, incluidas 22,126 angiospermas, 1,039 helechos y licofitas, y 149 gimnospermas, distribuidas en 2854 géneros, 297 familias y 73 órdenes; entre 33 y 50 % son especies endémicas (Hufnagel et al., 2021; Salinas-Rodríguez et al., 2018; Villaseñor, 2016). De este conjunto, aproximadamente 3,000-5,000 especies se han registrado como plantas medicinales (Cilia-López et al., 2021a; Cupido et al., 2024; Sansores-España et al., 2022). Sin embargo, solo una proporción limitada, alrededor del 5 %, ha sido estudiado desde las perspectivas fitoquímicas, farmacológicas, farmacocinéticas y toxicológicas (Alonso-Castro et al., 2017; Rodríguez-Hernández et al., 2022).

El uso de plantas medicinales en México se basa en conocimientos empíricos transmitidos de generación en generación por campesinos y grupos indígenas (Cuevas-Cianca et al., 2023; Velázquez-Vázquez et al., 2019). En la actualidad, el uso de plantas medicinales ha cobrado relevancia por su eficacia frente a enfermedades infecciosas y no infecciosas, con una baja incidencia de efectos secundarios (Sharma et al., 2023; Velázquez-Vázquez et al., 2019).

Con 417 géneros y 3,113 especies, Asteraceae constituye uno de los grupos de mayor diversidad de la flora mexicana. Veracruz, Durango, Oaxaca, Chiapas y Tamaulipas concentran una proporción importante de los géneros registrados, lo que refleja la amplitud de distribución de la familia en el país (Cilia-López et al., 2021a; Villaseñor, 2018). Esta diversidad se acompaña de un amplio patrimonio etnobotánico: distintas especies se emplean tradicionalmente para tratar afecciones digestivas, respiratorias, urinarias, inflamatorias y odontológicas, entre otras (Konovalov, 2014).

Entre las especies de uso medicinal documentado se encuentran *Artemisia absinthium*, *A. ludoviciana*, *Bidens odorata*, *Calendula officinalis*, *Heliopsis longipes*, *Tagetes erecta*, *T. lucida* y *Tanacetum parthenium*; tradicionalmente se utilizan para el tratamiento de infecciones respiratorias, digestivas y urinarias, así como de enfermedades no infecciosas como padecimientos cardiovasculares, reumatismo, inflamaciones intestinales, dismenorrea y diabetes (Alonso-Castro et al., 2017; Barrera-Vázquez et al., 2023; Palacios-Espinosa et al., 2021; Rodríguez-Hernández et al., 2022). Sus usos tradicionales y las actividades biológicas reportadas se han relacionado con la presencia de lactonas sesquiterpénicas, polifenoles y aceites esenciales; dichos compuestos metabólicos justifican su interés como punto de partida para estudios farmacológicos y biotecnológicos (Kostić et al., 2020).

Además de su importancia en la medicina tradicional y en la investigación farmacológica, las especies de Asteraceae presentan un potencial de aprovechamiento en diversos ámbitos biotecnológicos e industriales. Esta versatilidad se relaciona con su riqueza fitoquímica y con la funcionalidad de sus metabolitos, los cuales han motivado la exploración de aplicaciones en sectores como el alimentario, el cosmético, el agrícola y el ambiental (Iannicelli et al., 2018; Kozuharova et al., 2026; Salehi et al., 2020).

Los extractos vegetales constituyen una vía de aprovechamiento de metabolitos bioactivos sin requerir necesariamente someter cada componente a procesos exhaustivos de purificación (Camel, 2014). Este enfoque puede contribuir a optimizar los costos de producción y favorecer la obtención de productos terapéuticos más accesibles para los pacientes y los sistemas de salud (Vargas et al., 2023). Sin embargo, la naturaleza multicomponente de los extractos, aunada a la variabilidad de su composición fitoquímica entre especies, la inestabilidad fisicoquímica, la baja biodisponibilidad, la baja

solubilidad en agua y la toxicidad potencial representan desafíos constantes que restringen su aplicación clínica (Lestari et al., 2023; Vargas et al., 2023).

Por lo tanto, es necesario desarrollar estrategias innovadoras que superen dichas limitaciones y potencien las capacidades terapéuticas de los extractos vegetales. La nanotecnología constituye una herramienta relevante para este propósito, ya que las técnicas de nanoencapsulación –como sistemas vesiculares, partículas lipídicas y nanoemulsiones– pueden mejorar la estabilidad, la solubilidad, la biodisponibilidad y la liberación controlada de los compuestos bioactivos de origen vegetal, aumentando su eficacia antimicrobiana y reduciendo la toxicidad (Dewi et al., 2022; Nayak et al., 2022; Sandhiya & Ubaidulla, 2020; Yien et al., 2023).

Esta revisión tiene como objetivo analizar el potencial nanotecnológico de la familia Asteraceae en sistemas nanoestructurados considerando sus propiedades fisicoquímicas, actividades biológicas y viabilidad para la nanoencapsulación. De esta manera, se busca establecer un puente entre el conocimiento etnobotánico tradicional mexicano y la bionanotecnología, con énfasis en el aprovechamiento de compuestos bioactivos de interés terapéutico.

METODOLOGÍA

Para la elaboración de este trabajo, se realizó una búsqueda de literatura científica en bases de datos especializadas como Google Académico, PubMed, SciELO, ScienceDirect y Scopus, que abarcó el periodo 2012–2026. La finalidad fue recopilar, organizar, analizar y sintetizar la información disponible sobre el potencial de la familia Asteraceae como fuente de compuestos bioactivos y su integración como sistemas nanotecnológicos.

DESARROLLO Y DISCUSIÓN

FAMILIA ASTERACEAE: ETNOBOTÁNICA Y APLICACIONES BIOACTIVAS EMERGENTES

Asteraceae se caracteriza por sus capítulos, estructuras que aparentan una sola flor, aunque están formadas por numerosas flores sésiles dispuestas sobre un receptáculo común y rodeadas por un involucro (figura 1) (Villaseñor, 2018). Esta organización floral permite distinguir a la familia dentro de la flora mexicana. Por otra parte, sus especies presentan una amplia diversidad de hábitos de crecimiento, que incluye árboles, arbustos, subarbustos, hierbas y enredaderas adaptadas a distintos hábitats (Sharma et al., 2022).

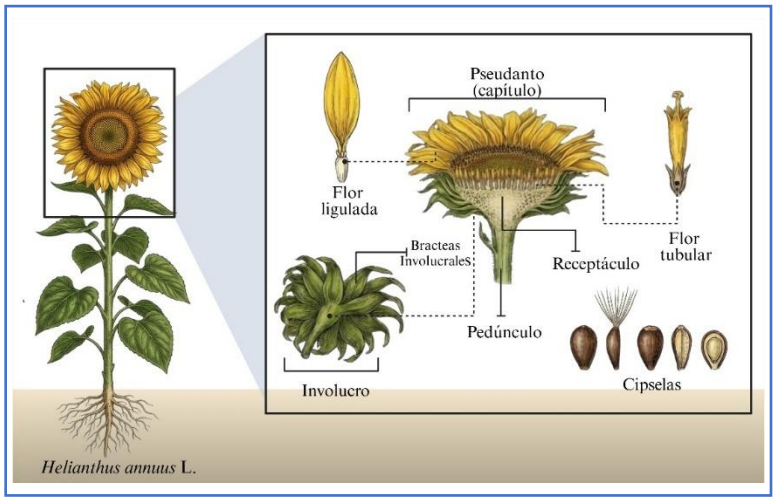


Figura 1. Estructura morfológica característica de las Asteraceae, ejemplificada en *Helianthus annuus* (girasol). Creada con BioRender (Acceso septiembre 2026).

El uso herbario de especies de Asteraceae tiene una larga trayectoria y se sustenta en una diversidad considerable de metabolitos secundarios; sin embargo, su estudio etnofarmacológico y su desarrollo comercial siguen siendo limitados (Panda et al., 2019). En México, el uso de plantas medicinales forma parte de prácticas prehispánicas que perduran (Martínez-González et al., 2024). Actualmente, entre el 20 % y el 39 % de la población utiliza medicinas herbales y recurre a prácticas indígenas de medicina tradicional (OMS, 2019). Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), se estima que 170 países —que representan el 87,18 % de la población mundial— recurren a la medicina herbolaria como principal fuente de

atención médica, siendo el uso de productos fitoterapéuticos una práctica profundamente arraigada en la cultura de algunos países en desarrollo (Ekor, 2014; OMS, 2019).

Dentro de este contexto, numerosas especies de Asteraceae destacan por sus aplicaciones terapéuticas (tabla 1), atribuidas a sus propiedades antidiuréticas, antiinflamatorias, antihelmínticas, antipiréticas, cardiotónicas, carminativas, hematoprotectoras, así como al tratamiento contra enfermedades gastrointestinales, respiratorias y dentales (Cilia-López et al., 2021a; Reimers et al., 2019; Sharma et al., 2017).

Tabla 1. Ejemplos representativos de especies de Asteraceae y sus aplicaciones etnobotánicas.

Especie	Nombre común	Aplicación	Resultados
Artemisia absinthium	Ajenjo	Hígado inflamado, fiebre, digestión y parásitos intestinales.	(Ahamad et al., 2019; Szopa et al., 2020)
Artemisia ludoviciana	Estafiate	Estómago (cólicos, diarrea), diabetes y resfriado común.	(Fernández-Cortés et al., 2025)
Calendula officinalis	Caléndula	Lesiones cutáneas (heridas, acné), llagas bucales y dolor de muelas	(Sapkota & Kunwar, 2024)
Gnaphalium oxyphyllum	Gordolobo	Bronquitis, tos, infecciones urinarias.	(Heredia-Castro et al., 2022)
Heliopsis longipes	Chilcuague	Dolor de muelas y muscular, desparasitante.	(Cilia-López et al., 2021)
Heterotheca inuloides	Árnica	Moretones, golpes, reumatismo.	(Rodríguez-Chávez et al., 2017)
Matricaria recutita	Manzanilla	Inflamación, espasmos, úlceras, problemas gastrointestinales, dolor menstrual, dolor bucal e insomnio infantil.	(Mailänder et al., 2022)
Montanoa frutescens	Zaopatle	Tuberculosis, tos, resfriado común, heridas de la piel, ansiedad y deficiencias reproductivas.	(Rodríguez-Landa et al., 2018)
Tagetes erecta	Cempasúchil	Cefalea, dolor muscular, dermatitis, lesiones cutáneas, verrugas.	(López Estrada et al., 2025)
Tagetes lucida	Yerbanís	Fiebre, diarrea, disentería, ansiedad y depresión	(Zarate-Escobedo et al., 2018)
Tithonia diversifolia	Chilicate	Malaria, abscesos, diabetes, sarampión, dolor menstrual, mordeduras de serpientes.	(Ajao & Moteetee, 2017)

El potencial terapéutico de las especies de Asteraceae se relaciona con su composición fitoquímica. Entre los grupos de compuestos reportados se encuentran los terpenoides —n particular los sesquiterpenoides—, ácidos fenólicos, alcaloides, compuestos fenólicos, compuestos volátiles y flavonoides (figura 2) (Bessada et al., 2015; Chadwick et al., 2013).

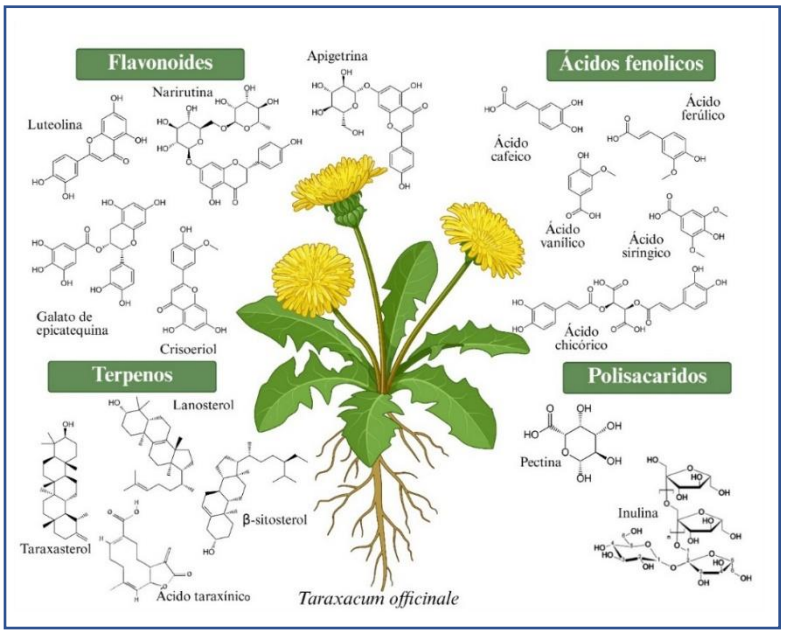


Figura 2. Composición fitoquímica de Asteraceae, tomando como modelo representativo a *Taraxacum officinale* (Rhayem et al., 2026; Fan et al., 2023). Creada con Biorender (Acceso Marzo 2026).

Esta diversidad química explica su amplio potencial bioquímico y farmacológico. La experiencia etnobotánica tradicional constituye una base estratégica para optimizar la investigación biotecnológica de Asteraceae (Cupido et al., 2024), desde una perspectiva integral que considere su hábitat natural, su valor genético intrínseco y su composición metabólica. Dicha caracterización biológica se complementa con su relevancia económica, evidenciada en sus aplicaciones industriales en los sectores agrícola, alimentario, cosmético y farmacéutico (tabla 2) (Iannicelli et al., 2018).

Tabla 2. Potencial de compuestos bioactivos de Asteraceae en aplicaciones emergentes.

Especie / Compuestos bioactivos	Aplicación y resultados	Referencia
Artemisia ludoviciana: Eupatilina, jaceosidina, arglanina, salvinina y ácido 3,5-dicafeoilquínico	Control de diabetes mellitus tipo 2: Reducción de la hipoglucemia	(Anaya-Eugenio et al., 2014)
Bidens pilosa: Flavonoides y ácidos fenólicos	Mastitis bovina: Inhibición y erradicación de biopelículas bacterianas	(Piccinin et al., 2022)
Brickellia cavanillesii: 12 compuestos fenólicos	Diabetes hepática: Incremento de la proteína relacionada con el transporte de glucosa	(Eshiet et al., 2014)
Cichorium intybus var. *foliosum*: Lactucina y lactocupicrina	Mejora sensorial en la industria alimentaria: Reducción del amargor mejorando aceptabilidad organoléptica de la planta	(De Bruyn et al., 2020)
Gymnosperma glutinosum: Ácido α-gymglu y β-ent-gymglu	Modulación de la respuesta inflamatoria: Inhibición parcial de los receptores de corticoesteroides y sintasas de óxido de nítrico	(Pérez-Gutiérrez et al., 2025)
Helianthus annuus: Celulosa, lignina, hemicelulosa, proantocianidinas y ácido ferúlico	Desarrollo de biopelículas antioxidantes para empaque activo de alimentos: Mejora en la resistencia mecánica y reducción de la permeabilidad al vapor de agua	(De'Nobili et al., 2021)
Heliopsis longipes: Afinina	Control contra enfermedades cardiovasculares: Inducción de vasodilatación	(Castro-Ruiz et al., 2017)
Mikania glomerata y *M. laevigata*: Cumarina	Desinfección odontológica, (antibiofilm): Inhibición del crecimiento de *Streptococcus mutans*, aplicación en cepillos de dientes	(Lessa et al., 2012)
Parthenium hysterophorus: Partenina, ácido cafeico, ácido vainílico, ácido clorogénico y ácido parahidroxibenzoico	Control biológico (bioherbicida): Inhibición de la germinación y crecimiento vegetal	(Bashar et al., 2023)
Taraxacum officinale: Polifenoles	Cosmética: Aceleración del proceso fermentativo y potenciación de la capacidad antioxidante	(Kucharska et al., 2025)

NANOTECNOLOGÍA: PLATAFORMAS DE NANOENCAPSULACIÓN

En las últimas décadas, la nanotecnología se ha desarrollado como uno de los campos más prometedores, debido al estudio de materiales a escala nanométrica y sus extraordinarias propiedades —mejor solubilidad, mayor estabilidad, inhibición de la degradación de los compuestos bioactivos y mayor biodisponibilidad— en relación con estructuras a micro y macroescala (Jafari, 2017; Kamble et al., 2025).

La nanoencapsulación es una técnica mediante la cual compuestos sensibles se incorporan o confinan en una matriz/recubrimiento, a escala nanométrica, mediante métodos de nanoemulsificación, nanoestructuración o nanocompósitos (Onyeaka et al., 2022). Este proceso puede proteger los compuestos frente a factores de degradación o reacciones adversas, además de permitir el control de su liberación. Asimismo, la obtención de sistemas homogéneos puede favorecer una mayor eficiencia de encapsulación y el desarrollo de propiedades fisicoquímicas adecuadas (Kour et al., 2026). De acuerdo con la aplicación prevista, pueden emplearse diferentes sistemas de nanoencapsulación (tabla 3), entre ellos nanoliposomas, nanopartículas, nanoesferas, nanoemulsiones, nanococleados y micelas (Paredes et al., 2016).

Tabla 3. Plataformas de nanoencapsulación: ventajas, limitaciones y métodos de obtención.

Plataforma	Aspectos clave	Referencias
Nanoliposomas	Vesículas cerradas formadas por moléculas de fosfolípidos **Ventajas:** encapsulación de compuestos hidrofílicos e hidrofóbicos y biocompatibilidad relativa **Limitaciones:** agregación y coalescencia por interacciones electrostáticas fuertes **Obtención:** hidratación de película delgada, técnica de inyección de etanol o evaporación en fase inversa	(Aguilar-Pérez et al., 2020; Kamble et al., 2025)
Nanopartículas	Sistemas supramoleculares sólidos orgánicos e inorgánicos de 10-100 nm. Pueden presentarse como poliméricas, biológicas, lipídicas y metálicas. **Ventajas:** propiedades ajustables y liberación controlada **Limitaciones:** toxicidad que depende de su composición, de su comportamiento y de su estabilidad variables. **Obtención:** molienda mecánica, sonicación, coprecipitación o extractos biológicos	(Altammar, 2023; Khan et al., 2023; Parveen et al., 2016)
Nanoesferas	Matrices poliméricas de 10-200 nm, amorfas o cristalinas. Se clasifican en biodegradables (albúmina, gelatina, almidón, etc.), y no biodegradables (ácido poliláctico) **Ventajas:** mayor área superficial y respuesta rapida a estimulos **Limitaciones:** agregación, estabilidad fisiológica reducida y escalamiento complejo **Obtención:** emulsificación-evaporación, desolvatación o gelificación iónica.	(Pathak et al., 2019; Wang et al., 2012)
Nanoemulsiones	Gotas de 50-200 nm, estabilizadas por un surfactante que actúa como película interfacial entre los líquidos inmiscibles (aceite y agua) **Ventajas:** protección frente a la degradación y favorece la dispersión de compuestos lipofílicos. **Limitaciones:** maduración de Ostwald, floculación y coalescencia **Obtención:** emulsificación espontánea, inversión de fase por composición o homogeneización por ultrasonidos	(Mushtaq et al., 2023)
Nanococleados	Estructuras lipídicas multicapa enrolladas, inferiores a 500 nm **Ventajas:** liberación controlada, mejora de compuesto poco solubles y menor susceptibilidad a la oxidación protección **Limitaciones:** condiciones específicas de conservación, riesgo de agregación durante el almacenamiento **Obtención:** hidrogel, diálisis de calcio directo o sistema de emulsión acuosa-acuosa binaria	(Verekar et al., 2024)
Micelas	Sistemas autoensamblados núcleo-cubierta de 10-100 nm **Ventajas:** carga y liberación dirigida, biocompatibilidad y protección de compuestos **Limitaciones:** pobre solubilidad y baja estabilidad física *in vivo* **Obtención:** emulsión aceite/agua, película delgada o microemulsión	(Perumal et al., 2022)

La versatilidad química de las especies de Asteraceae ha despertado interés en diversos campos de estudio por su potencial de aplicación y sus resultados prometedores. No obstante, su aprovechamiento enfrenta limitaciones que pueden agruparse en dos niveles interrelacionados. Por un lado, la variabilidad de los cultivos y de los extractos vegetales influye en la composición fitoquímica de la materia prima. Asimismo, los compuestos bioactivos presentan limitaciones asociadas con la degradación, la baja estabilidad fisicoquímica, la solubilidad reducida, la biodisponibilidad variable y las dificultades para su producción a gran escala (Dewi et al., 2022; Falzon & Balabanova, 2017).

En este contexto, la nanotecnología representa un área de oportunidad para mejorar el aprovechamiento de compuestos bioactivos de origen vegetal y ampliar sus posibilidades de aplicación (Dourado et al., 2026). Mediante el diseño de sistemas de nanoencapsulación y otras nanoestructuras, es posible favorecer la estabilidad fisicoquímica, la solubilidad, la biodisponibilidad y la liberación controlada de compuestos, optimizando su desempeño terapéutico (tabla 4) (Lv et al., 2024; Pérez Hernández et al., 2025; Yien et al., 2023).

Tabla 4. Potencial nanotecnológico de las Asteraceae: sistemas de nanoencapsulación, compuestos bioactivos y aplicaciones.

Especie	Sistema/ Aplicación	Referencias
Achillea millefolium: extractos acuosos/etanólicos (flavonoides, ácidos fenólicos y terpenos)	MgO NPs con actividad antimalárica frente a *Plasmodium falciparum* (acción antiplasmódica)	(Khamsehpour et al., 2025)
Artemisia absinthium: aceites esenciales	Nanococleados como tratamiento de la leishmaniasis causada por *Leishmania amazonensis*	(Tamargo et al., 2017)
Artemisia annua y *A. sieberi*: aceites esenciales	Nanoliposomas con potencial larvicida contra *Aedes aegypti* y *Anopheles stephensi*	(Sanei-Dehkordi et al., 2023)
Arctium lappa: extracto acuoso	AgNPs y AuNPs como antimicrobiano y biorremediación: inhibición de *E. coli* y *A. tumefaciens*	(Nguyen et al., 2018)
Artemisia dracunculus: aceite esencial (estragol, β-cis-ocimeno, β-trans-ocimeno, 1-limoneno)	Nanoemulsión aceite-agua como conservante natural en alimentos: actividad antioxidante y antimicrobiana (*S. aureus, L. monocytogenes* y *S. dysenteriae*)	(Azizkhani et al., 2020)
Calendula officinalis: polvo y aceite esencial	Nanopartículas matriz-reservorio (gelatina/colágeno) con efecto anticancerígeno: citotoxicidad selectiva frente al cáncer de mama y de hígado.	(Lam et al., 2014)
Eclipta prostrata: extracto acuoso (wedelolactona, luteolina y apigenina)	CaO NPs/enjuague bucal: actividad antimicrobiana (*E. faecalis, S. mutans* y *C. albicans*)	(Sanjana et al., 2025)
Heterotheca inuloides: extracto acuoso (flavonoides, sesquiterpenoides, triterpenoides y esteroles)	AgNPs para recubrimiento de suturas quirúrgicas actividad antimicrobiana (*S. aureus* y *E. coli*)	(Guadarrama-Reyes et al., 2019)
Matricaria chamomilla: aceite esencial ((Z)-β-farneseno, α-bisabolol, óxidos de bisabolol, camazuleno)	NPs de quitosano para tratamiento de leishmaniasis cutánea: actividad antiparasitaria frente a *Leishmania amazonensis*	(Karam et al., 2020)

De manera complementaria a la nanoencapsulación, la integración de la nanotecnología con la biotecnología —bionanotecnología— permite emplear

extractos vegetales no solo como materiales de interés biológico, sino también como componentes funcionales para la obtención de nanoestructuras. Bajo un enfoque alineado con los principios de la química verde, los metabolitos presentes en los extractos pueden actuar como agentes reductores y estabilizantes durante la síntesis de nanopartículas, lo que permite minimizar el uso de algunos precursores químicos convencionales (Filho & Backx, 2020). Por tanto, la incorporación de extractos vegetales en la síntesis de nanocompuestos debe evaluarse considerando tanto las condiciones de obtención como las propiedades fisicoquímicas del nanomaterial y su respuesta frente a los microorganismos (Backx et al., 2021).

VARIABILIDAD FITOQUÍMICA E IMPACTO EN LA SÍNTESIS DE NANOPARTÍCULAS

La variabilidad química de los extractos vegetales, influida por factores ambientales, genéticos y de procesamiento, constituye uno de los principales desafíos para su estandarización y reproducibilidad (Yien et al., 2023). Aunque esta variabilidad puede afectar el desempeño de diferentes plataformas de nanoencapsulación, su impacto se observa de manera particularmente directa en la biosíntesis de nanopartículas (Jaison et al., 2023).

Figueiredo et al. (2008) señalan que la producción de metabolitos secundarios depende de la etapa de desarrollo de los órganos vegetales, del tipo de tejido, de la presencia de estructuras secretorias, de las condiciones climáticas, de la estación del año, de la variación geográfica, de los daños mecánicos o químicos y de las condiciones de almacenamiento, lo que genera diferencias marcadas incluso entre plantas de la misma especie.

El momento de cosecha es un factor fenológico determinante para orientar el uso funcional de la biomasa. Mandim et al. (2021), demostraron que el estado de madurez de *Cynara cardunculus* L. var. *altilis* modifica significativamente la composición fenólica y las propiedades biológicas del extracto. Las etapas tempranas presentaron el mayor contenido de polifenoles (hasta 101 mg/g de extracto), con niveles elevados de ácidos 5-*O*-cafeoilquínico y 1,5-di-*O*-cefaoilquínico, asociados a una fuerte actividad antioxidante y actividad antibacteriana contra *Bacillus cereus*. Las etapas intermedias exhibieron mayor potencial antiinflamatorio y citotóxico, mientras que en los estadios tardíos mostraron una reducción marcada en la diversidad fenólica y una disminución del rendimiento de extracción de al menos 50 %.

Aunado a la variación fenológica, la composición genética induce cambios sustanciales en la composición de la materia prima. En *Echinacea purpurea,* la duplicación cromosómica incrementa la biomasa y eleva los contenidos de

ácidos fenólicos en todos los órganos. Durante la floración (julio-agosto), los terpenoides muestran rendimientos superiores con valores de 4,14–4,71 g/planta frente a 3.80-4.23 g/planta en diploides. La actividad antioxidante es mayor en plantas tetraploides y se correlaciona significativamente con el contenido de ácido chicórico (Mei et al., 2020).

Los factores de estrés abiótico también modifican la acumulación de metabolitos (Petrova et al., 2024). En cultivos *in vitro* de *Silybum marianum,* la calidad espectral de la luz modula de manera marcada la biosíntesis de flavonolignanos y se correlaciona positivamente con el contenido de polifenoles totales, de flavonoides totales y con la actividad antioxidante (Younas et al., 2018).

Por su parte, las variaciones ecológicas y edáficas contribuyen de manera significativa a la plasticidad metabólica en las Asteraceae. En *Eclipta prostrata,* la exposición solar, el tipo de suelo y el cocultivo con *Arachis repens* incrementan la biosíntesis de ácidos clorogénicos, flavonoides O-glucosilados y cumestanos, sin correlación directa con la biomasa, lo que evidencia mecanismos adaptativos independientes del crecimiento vegetal (Fonseca et al., 2025).

Por otro lado, la elección de la técnica de extracción es una variable que influye en la solubilidad, la estabilidad, el rendimiento y la bioactividad del extracto (Sun et al., 2025). Variables como el solvente, la temperatura, el tiempo, el pH y el tamaño de partícula vegetal influyen directamente en la composición del extracto final (Ameer et al., 2017; Antony & Farid, 2022; Enaru et al., 2021; da Silva et al., 2016). Esta interacción de factores fenológicos, genéticos, ambientales y de procesamiento define el perfil fitoquímico final y condiciona la síntesis posterior de nanopartículas, afectando directamente la eficiencia de encapsulación, el potencial zeta, el tamaño y la estabilidad coloidal (Jaison et al., 2023; Yien et al., 2023).

Estudios como el de Velgosova et al. (2024) demuestran que la composición fitoquímica del extracto -determinada por la especie y tipo de biomaterial empleado- es un factor decisivo en la reducción y estabilidad de nanopartículas de plata (AgNPs). De manera complementaria, Rizki et al. (2026) reportaron que, aun bajo condiciones sintéticas idénticas, la selección del extracto vegetal produce nanopartículas con tamaños contrastantes, lo que evidencia que las diferencias en la capacidad reductora y estabilizante de cada extracto generan nanoestructuras no equivalentes incluso cuando los parámetros experimentales se mantienen constantes.

La variabilidad de tamaño de las nanopartículas se relaciona directamente con la estructura molecular de los fitoquímicos y con su eficiencia como agentes reductores y de recubrimiento (Baba et al., 2026). Khattak et al. (2019) confirmaron que la composición del extracto modula el crecimiento y

la morfología final de las AgNPs, mientras que Adewale et al. (2020) demostraron que el método de extracción y el contenido fenólico del extracto influyen directamente en el tamaño y la morfología de nanoformulaciones.

Las nanopartículas sintetizadas a partir de extractos vegetales presentan patrones de estabilidad coloidal y química superficial determinados por los metabolitos (generalmente fenoles, flavonoides, proteínas, polisacáridos y terpenoides) que se adsorben en la superficie. Estos biocompuestos actúan como agentes de recubrimiento, previniendo la agregación y modulando el potencial zeta. Valores superiores a 30 mV indican alta estabilidad, mientras que valores entre -20 y -30 mV reflejan una estabilidad moderada debida a la combinación de efectos electrostáticos y estéricos (Baba et al., 2026). Este principio se evidencia en las AgNPs sintetizadas con extracto de *Manikara zapota*, cuyo potencial zeta de -27,05 mV y tamaño de 9,62 nm le confieren estabilidad coloidal y funcionalidad como sonda colorimétrica, lo que demuestra que el perfil fitoquímico y la capacidad de adsorción superficial determinan tanto la estabilidad como las propiedades funcionales del nanosistema (Sahu et al., 2024). Resultados comparables fueron reportados por Mehdipour et al. (2024) en nanopartículas de zinc sintetizadas con extracto de *Lavandula stoechas*, donde el potencial zeta de -27,9 mV y un tamaño de 50 nm indican una estabilidad coloidal moderada, atribuible a la acción sinérgica de compuestos fitoquímicos como agentes estabilizantes por carga superficial y impedimento estérico. Por su parte, Tran et al. (2024) obtuvieron potenciales zeta de -42,2 mV y -62,6 mV en nanopartículas de óxido de zinc utilizando extracto de *Eclipta prostrata* y *Piper longum,* donde los valores de potencial zeta se correlacionaron con el contenido fenólico y de flavonoides de cada extracto. En conjunto, estos hallazgos reafirman que el perfil fitoquímico del extracto modula la carga superficial y, por ende, el grado de estabilidad coloidal de las nanopartículas.

Por consiguiente, controlar estrictamente los parámetros de síntesis y la variabilidad en la composición fitoquímica del extracto resulta indispensable para estandarizar las propiedades fisicoquímicas (tamaño y morfología), la estabilidad y la reproducibilidad de las nanoestructuras (Abegunde et al., 2024).

Aunque las nanopartículas mediadas por extractos vegetales —particularmente especies de la familia Asteraceae— muestran un gran potencial, su producción a gran escala enfrenta limitaciones asociadas a la variabilidad climática, las temporadas de cultivo y la interferencia de fitoquímicos (Jaison et al., 2023), factores que condicionan el rendimiento, la estabilidad y la purificación del producto final. Aun contando con formulaciones homogéneas, su escalamiento y transición al mercado requieren un riguroso control de calidad del material vegetal, así como el cumplimiento de estándares toxicológicos y regulatorios internacionales que garanticen su seguridad y reproducibilidad (Barhoum et al., 2022).

PRODUCCIÓN Y DESAFÍOS DE ESCALAMIENTO

La producción industrial de nanopartículas mediadas por especies de *Asteraceae* enfrenta obstáculos significativos derivados de la naturaleza biológica de la materia prima. Factores como las condiciones climáticas, las temporadas de cultivo y la disponibilidad de biomasa afectan la consistencia de los extractos vegetales, lo que dificulta la conservación de propiedades fisicoquímicas constantes entre lotes (Jaison et al., 2023). A ello se suman variables operativas —tiempo de reacción, pH, temperatura, uso de reactivos y consumo de energía— que, al trasladarse a sistemas de mayor volumen, generan pérdida de control y variabilidad de tamaño, morfología y rendimiento de las nanoestructuras (Jaison et al., 2023; Marchese Robinson et al., 2016). En nanomedicina y manufactura, este escalamiento representa uno de los cuellos de botella para la comercialización, ya que exige controles rigurosos y protocolos de preparación que aseguren la estabilidad y la reproducibilidad de los materiales (Feng et al., 2019; Sammasagi et al., 2025; Yien et al., 2023).

Para mitigar estas limitaciones, se requiere la estandarización de los extractos y la implementación de plataformas de química de flujo continuo, que permiten una síntesis más eficiente y controlada en periodos breves, reduciendo la variabilidad del proceso (Huanbutta et al., 2024; Kustiawan et al., 2024; Nature Nanotechnology, 2016; Patel & Sanap, 2026).

SEGURIDAD, TOXICIDAD Y ASPECTOS REGULATORIOS

Si bien la química verde ha transformado la síntesis de nanomateriales, la variabilidad inherente de los compuestos bioactivos y la falta de control estricto sobre los parámetros estructurales persisten incluso en sistemas de síntesis verde (Álvarez-Chimal et al., 2025;Osman et al., 2024).

Paralelamente, existen riesgos asociados a la nanotecnología para la salud humana y el medio ambiente. Debido a sus dimensiones nanométricas, estas estructuras pueden favorecer la penetración en el organismo y desencadenar afecciones respiratorias u otras patologías graves, mientras que la evidencia disponible sobre su acumulación y ecotoxicidad a largo plazo sigue siendo limitada (Pietroiusti et al., 2018). Aunque la caracterización fisicoquímica y los ensayos *in vitro* han permitido avances relevantes, la consolidación de estas nanoformulaciones se ve frenada por la incertidumbre toxicológica y las restricciones regulatorias vigentes (Islam et al., 2025; Yien et al., 2023).

PERSPECTIVAS FUTURAS

Aunque la nanoencapsulación de compuestos bioactivos de Asteraceae presenta resultados alentadores, su transición hacia la práctica clínica y los procesos de producción a gran escala requieren un enfoque integral y coordinado entre distintas áreas de investigación (Singh et al., 2024).

Para avanzar hacia aplicaciones reales, es necesario integrar estrategias de producción sostenible que reduzcan el consumo energético y la generación de residuos —en concordancia con los principios de la química verde—, junto con el aprovechamiento del conocimiento etnobotánico para orientar la selección de especies y compuestos. La articulación multidisciplinaria de estos elementos permitirá fortalecer el desarrollo de la bionanotecnología aplicada a la familia Asteraceae.

CONCLUSIONES

La familia Asteraceae representa un puente estratégico entre el conocimiento etnobotánico mexicano y la innovación nanotecnológica. Su riqueza fitoquímica —flavonoides, terpenoides, lactonas sesquiterpénicas y ácidos fenólicos— no solo respalda sus usos medicinales tradicionales, sino que también ofrece una plataforma versátil para el desarrollo de nanoformulaciones con aplicaciones en biomedicina, alimentos, cosmética y biorremediación.

No obstante, el tránsito de este potencial a productos reproducibles y seguros exige superar la variabilidad intrínseca de los extractos vegetales, la cual impacta directamente en la síntesis, estabilidad y desempeño de las nanoestructuras. Por ello, la estandarización fitoquímica, el control de los parámetros de extracción y síntesis, así como la evaluación toxicológica y el escalamiento bajo criterios de química verde se perfilan como condiciones indispensables para consolidar esta convergencia.

Así, la articulación entre el saber etnobotánico y la nanotecnología no solo amplía el horizonte de aprovechamiento de las Asteraceae, sino que constituye una vía sostenible para generar innovaciones terapéuticas y biotecnológicas con pertenencia cultural y ambiental.

AGRADECIMIENTOS

La autora agradece al SECIHTI por la beca otorgada con número 863323 y al Cuerpo Académico de Ciencia y Tecnología de Polímeros de la Facultad de Ciencias Químicas por el apoyo en la estancia posdoctoral en sus instalaciones.

REFERENCIAS

Abegunde, S. M., Afolayan, B. O., & Ilesanmi, T. M. (2024). Ensuring sustainable plant-assisted nanoparticles synthesis through process standardization and reproducibility: Challenges and future directions – A review. *Sustainable Chemistry One World*, *3*: 100014. DOI: 10.1016/j.scowo.2024.100014.

Adewale, O. B., Egbeyemi, K. A., Onwuelu, J. O., Potts-Johnson, S. S., Anadozie, S. O., Fadaka, A. O., Osukoya, O. A., Aluko, B. T., Johnson, J., Obafemi, T. O., & Onasanya, A. (2020). Biological synthesis of gold and silver nanoparticles using leaf extracts of *Crassocephalum rubens* and their comparative in vitro antioxidant activities. *Heliyon*, *6*(11): e05501. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e05501.

Aguilar-Pérez, K. M., Avilés-Castrillo, J. I., Medina, D. I., Parra-Saldivar, R., & Iqbal, H. M. N. (2020). Insight Into Nanoliposomes as Smart Nanocarriers for Greening the Twenty-First Century Biomedical Settings. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, *8*: 579536. DOI: 10.3389/fbioe.2020.579536.

Ahamad, J., Mir, S. R., & Amin, S. (2019). A pharmacognostic review on *Artemisia absinthium*. *International Research Journal of Pharmacy*, *10*(1): 25–31. DOI: 10.7897/2230-8407.10015.

Ajao, A. A., & Moteetee, A. N. (2017). *Tithonia diversifolia* (Hemsl) A. Gray. (Asteraceae: Heliantheae), an invasive plant of significant ethnopharmacological importance: A review. *South African Journal of Botany*, *113*: 396–403. DOI: 10.1016/j.sajb.2017.09.017.

Alonso-Castro, A. J., Zapata-Morales, J. R., Ruiz-Padilla, A. J., Solorio-Alvarado, C. R., Rangel-Velázquez, J. E., Cruz-Jiménez, G., Orozco-Castellanos, L. M., Domínguez, F., Maldonado-Miranda, J. J., Carranza-Álvarez, C., Castillo-Pérez, L. J., Solano, E., Isiodia-Espinoza, M. A., del Carmen Juárez-Vázquez, M., Argueta-Fuertes, M. A., González-Sánchez, I., & Ortiz-Andrade, R. (2017). Use of medicinal plants by health professionals in Mexico. *Journal of Ethnopharmacology*, *198*: 81–86. DOI: 10.1016/j.jep.2016.12.038.

Altammar, K. A. (2023). A review on nanoparticles: characteristics, synthesis, applications, and challenges. *Frontiers in Microbiology*, *14*: 1155622. DOI: 10.3389/fmicb.2023.1155622.

Álvarez-Chimal, R., Arenas-Alatorre, J. Á., Marichi-Rodríguez, F., Correa-Prado, R., & Álvarez-Pérez, M. A. (2025). La química verde en la síntesis de nanopartículas y sus propiedades antibacterianas. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, *18*(34): e69826. DOI: 10.22201/ceiich.24485691e.2025.34.69826.

Ameer, K., Shahbaz, H. M., & Kwon, J. H. (2017). Green Extraction Methods for Polyphenols from Plant Matrices and Their Byproducts: A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *16*(2): 295–315. DOI: 10.1111/1541-4337.12253.

Anaya-Eugenio, G. D., Rivero-Cruz, I., Rivera-Chávez, J., & Mata, R. (2014). Hypoglycemic properties of some preparations and compounds from *Artemisia ludoviciana* Nutt. *Journal of Ethnopharmacology*, *155*(1): 416–425. DOI: 10.1016/j.jep.2014.05.051.

Antony, A., & Farid, M. (2022). Effect of Temperatures on Polyphenols during Extraction. *Applied Sciences*, *12*(4): 2107. DOI: 10.3390/app12042107

Azizkhani, M., Jafari Kiasari, F., Tooryan, F., Shahavi, M. H., & Partovi, R. (2020). Preparation and evaluation of food-grade nanoemulsion of tarragon (*Artemisia dracunculus* L.) essential oil: antioxidant and antibacterial properties. *Journal of Food Science and Technology*, *58*(4): 1341–1348. DOI: 10.1007/s13197-020-04645-6.

Baba, I. A., Awe, O. B., Mustapha, S., Abubakar, M. A., Abdulkareem, A. S., Tijani, J. O., & Obayomi, K. S. (2026). Influence of plant-derived extracts on the synthesis, physicochemical properties, and applications of metal and metal oxide nanoparticles. *Hybrid Advances*, *13*: 100666. DOI: 10.1016/j.hybadv.2026.100666.

Backx, B. P., Santos, M. S. dos, Santos, O. A. L. dos, & Filho, S. A. (2021). The Role of Biosynthesized Silver Nanoparticles in Antimicrobial Mechanisms. *Current Pharmaceutical Biotechnology*, *22*(6): 762–772. DOI: 10.2174/1389201022666210202143755.

Barhoum, A., García-Betancourt, M. L., Jeevanandam, J., Hussien, E. A., Mekkawy, S. A., Mostafa, M., Omran, M. M., Abdalla, M. S., & Bechelany, M. (2022). Review on Natural, Incidental, Bioinspired, and Engineered Nanomaterials: History, Definitions, Classifications, Synthesis, Properties, Market, Toxicities, Risks, and Regulations. *Nanomaterials*, *12*(2): 177. DOI: 10.3390/nano12020177.

Barrera-Vázquez, O. S., Montenegro-Herrera, S. A., Martínez-Enríquez, M. E., Escobar-Ramírez, J. L., & Magos-Guerrero, G. A. (2023). Selection of Mexican Medicinal Plants by Identification of Potential Phytochemicals with Anti-Aging, Anti-Inflammatory, and Anti-Oxidant Properties through Network Analysis and

Chemoinformatic Screening. *Biomolecules*, *13*(11): 1673. DOI: 10.3390/biom13111673.

Bashar, H. M. K., Juraimi, A. S., Ahmad-Hamdani, M. S., Uddin, K., Asib, N., Anwar, P., Rahaman, F., Haque, M. A., & Hossain, A. (2023). Evaluation of allelopathic effects of *Parthenium hysterophorus* L. methanolic extracts on some selected plants and weeds. *PLOS ONE*, *18*(1): e0280159. DOI: 10.1371/journal.pone.0280159.

Bessada, S. M. F., Barreira, J. C. M., & Oliveira, M. B. P. P. (2015). Asteraceae species with most prominent bioactivity and their potential applications: A review. *Industrial Crops and Products*, *76*: 604–615. DOI: 10.1016/j.indcrop.2015.07.073.

Biorender, & Garcia-Conde, K. B. (2026). Composición fitoquímica de Asteraceae, tomando como modelo representativo a Taraxacum officinale. https://biorender.com/yfp971s

Biorender, & Garcia-Conde, K. B. (2026). Estructura morfológica característica de Asteraceae, ejemplificada con Helianthus annuus L. (girasol). https://biorender.com/kby87fc

Camel, V. (2014). Extraction Methodologies in Plants: General Introduction. In R. A. Mayers (Ed.), Encyclopedia of Analytical Chemistry (pp. 1–26). DOI: 10.1002/9780470027318.a9902.

Castro-Ruiz, J. E., Rojas-Molina, A., Luna-Vázquez, F. J., Rivero-Cruz, F., García-Gasca, T., & Ibarra-Alvarado, C. (2017). Affinin (Spilanthol), Isolated from *Heliopsis longipes*, Induces Vasodilation via Activation of Gasotransmitters and Prostacyclin Signaling Pathways. *International Journal of Molecular Sciences*, *18*(1): 218. DOI: 10.3390/ijms18010218.

Chadwick, M., Trewin, H., Gawthrop, F., & Wagstaff, C. (2013). Sesquiterpenoids Lactones: Benefits to Plants and People. *International Journal of Molecular Sciences*, *14*(6): 12780. DOI: 10.3390/ijms140612780.

Cilia-López, V. G., Cariño-Cortés, R., & Zurita-Salinas, L. R. (2021). Ethnopharmacology of the Asteraceae Family in Mexico. *Botanical Sciences*, *99*(3): 455–486. DOI: 10.17129/botsci.2715.

Cuevas-Cianca, S. I., González-Campos, R. E., Mejía Méndez, J. L., Sánchez Arreola, E., Juárez, Z. N., & Hernández, L. R. (2023). Anticancer Properties of Mexican Medicinal Plants: An Updated Review. *Natural Product Communications*, *18*(7):1-14. DOI: 10.1177/1934578X231187458.

Cupido, M., De-Nova, J. A., & Cilia-López, V. G. (2024). Evolutionary approaches in ethnobotany of medicinal plants and bioprospecting. *Botanical Sciences*, *102*(1): 26–38. DOI: 10.17129/botsci.3325.

da Silva, R. P. F. F., Rocha-Santos, T. A. P., & Duarte, A. C. (2016). Supercritical fluid extraction of bioactive compounds. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, *76*: 40–51. DOI: 10.1016/j.trac.2015.11.013.

De Bruyn, C., Ruttink, T., Eeckhaut, T., Jacobs, T., De Keyser, E., Goossens, A., & Van Laere, K. (2020). Establishment of CRISPR/Cas9 Genome Editing in Witlof (*Cichorium intybus* var. *foliosum*). *Frontiers in Genome Editing*, *2*: 604876. DOI: 10.3389/fgeed.2020.604876.

De'Nobili, M. D., Bernhardt, D. C., Basanta, M. F., & Rojas, A. M. (2021). Sunflower (*Helianthus annuus* L.) Seed Hull Waste: Composition, Antioxidant Activity, and Filler Performance in Pectin-Based Film Composites. *Frontiers in Nutrition*, *8*: 777214. DOI: 10.3389/fnut.2021.777214.

Dewi, M. K., Chaerunisa, A. Y., Muhaimin, M., & Joni, I. M. (2022). Improved Activity of Herbal Medicines through Nanotechnology. *Nanomaterials*, *12*(22): 4073. DOI: 10.3390/nano12224073.

Dourado, D., Formiga, F. R., Alencar, É. do N., & Reynaud, F. (2026). Advances in nanotechnology applied to natural products. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, *17*(1): 555–558. DOI: 10.3762/bjnano.17.36.

Ekor, M. (2014). The growing use of herbal medicines: issues relating to adverse reactions and challenges in monitoring safety. *Frontiers in Pharmacology*, *4*: 177. DOI: 10.3389/fphar.2013.00177.

Enaru, B., Dretcanu, G., Pop, T. D., Stănilă, A., & Diaconeasa, Z. (2021). Anthocyanins: Factors Affecting Their Stability and Degradation. *Antioxidants*, *10*(12): 1967. DOI: 10.3390/antiox10121967.

Eshiet, E. R., Zhu, J., & Smith, E. E. (2014). Lyophilized Tea Extracts of *Brickellia cavanillesii* (Asteraceae): In Vitro Characterization of Biological Activity. *Journal of Food Science*, *79*(7): T1454–T1461. DOI: 10.1111/1750-3841.12519.

Falzon, C. C., & Balabanova, A. (2017). Phytotherapy: An Introduction to Herbal Medicine. *Primary Care - Clinics in Office Practice*, *44*(2): 217–227. DOI: 10.1016/j.pop.2017.02.001.

Fan, M., Zhang, X., Song, H., & Zhang, Y. (2023). Dandelion (*Taraxacum* Genus): A Review of Chemical Constituents and Pharmacological Effects. *Molecules*, *28*(13): 5022. DOI: 10.3390/molecules28135022.

Feng, J., Markwalter, C. E., Tian, C., Armstrong, M., & Prud'Homme, R. K. (2019). Translational formulation of nanoparticle therapeutics from laboratory discovery to clinical scale. *Journal of Translational Medicine*, *17*(1): 200. DOI: 10.1186/s12967-019-1945-9.

Fernández-Cortés, J. M., Balderas-Robles, A. A., Dufoo-Hurtado, E., Ramírez-Jiménez, A. K., Ruiz-Campos, G., Madariaga-Navarrete, A., Sharma, A., & Angulo-Bejarano, P. I. (2025). Micropropagation and Phytochemical Characterization of *Artemisia ludoviciana* Nutt.: Antioxidant Activity and Phenolic Profiles. *Plants*, *14*(24): 3781. DOI: 10.3390/plants14243781.

Figueiredo, A. C., Barroso, J. G., Pedro, L. G., & Scheffer, J. J. C. (2008). Factors affecting secondary metabolite production in plants: Volatile components and essential oils. *Flavour and Fragrance Journal*, *23*(4): 213–226. DOI: 10.1002/ffj.1875.

Filho, S. A., & Backx, B. P. (2020). Nanotecnologia e seus impactos na sociedade. *Revista Tecnologia e Sociedade*, *16*(40): 1–15. https://doi.org/10.3895/rt.s.v16n40.9870.

Fonseca, S. T. D. da, Pereira, A. M. S., & Lopes, N. P. (2025). Secondary Metabolite Plasticity in *Eclipta prostrata* (L.) L. (Asteraceae) under Environmental and Biological Stressors. *ACS Omega*, *10*(51): 62916. DOI: 10.1021/acsomega.5c08697.

Guadarrama-Reyes, S. C., Morales-Luckie, R. A., Sánchez-Mendieta, V., González-Pedroza, M. G., Lara-Carrillo, E., Velazquez-Enriquez, U., Toral-Rizo, V., & Scougall-Vilchis, R. (2019). Green Synthesis of Silver Nanoparticles Using *Heterotheca inuloides* and Its Antimicrobial Activity in Catgut Suture Threads. In S.M. Averamescu, K. Akhtar, I. Fierascu, S. B. Khan, F. Ali & A. M. Asiri (Eds.), Engineered Nanomaterials - Health and Safety. [En línea]. Disponible en: https://www.intechopen.com/chapters/69471. Fecha de consulta: 18 de septiembre del 2026

Guzmán Gallardo, F. L. (2025). Comprensión biocultural de las plantas medicinales en México. *Mexican Journal of Medical Research ICsa*, *13*(25): 81–85. DOI: 10.29057/mjmr.v13i25.12390.

Heredia-Castro, P. Y., García-Baldenegro, C. V., Espinosa, A. S., de Jesús Tolano-Villaverde, I., Manzanares-Quin, C. G., Valdez-Domínguez, R. D., Ibarra-Zazueta, C., Osuna-Chávez, R. F., Rueda-Puente, E. O., Hernández-Moreno, C. G., Barrales-Heredia, S. M., & Sosa-Castañeda, J. (2022). Perfil fitoquímico, actividad antimicrobiana y antioxidante de extractos de *Gnaphalium oxyphyllum* y *Euphorbia maculata* nativas de Sonora, México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, *13*(4): 928–942. DOI: 10.22319/rmcp.v13i4.6042.

Huanbutta, K., Suwanpitak, K., Weeranoppanant, N., Sriamornsak, P., Garg, K., Sharma, S., Singh, I., & Sangnim, T. (2024). Continuous flow synthesis: A promising platform for the future of nanoparticle-based drug delivery. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, *91*: 105265. DOI: 10.1016/j.jddst.2023.105265.

Hufnagel, L., Mics, F., Hufnagel, L., & Mics, F. (2021). Introductory Chapter: Biodiversity of Mexico. In L. Hufnagel (Ed.), Natural History and Ecology of Mexico and Central America. [En línea]. Disponible en: https://www.intechopen.com/chapters/77384. Fecha de consulta: 14 de abril del 2026.

Iannicelli, J., Guariniello, J., Álvarez, S. P., & Escandón, A. (2018). Usos tradicionales, estado de conservación y avances biotecnológicos para un grupo de plantas aromáticas / medicinales nativas de América. *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas*, *17*(5): 453–491.

Jaison, J. P., Balasubramanian, B., Gangwar, J., James, N., Pappuswamy, M., Anand, A. V., Al-Dhabi, N. A., Valan Arasu, M., Liu, W. C., & Sebastian, J. K. (2023). Green

Synthesis of Bioinspired Nanoparticles Mediated from Plant Extracts of Asteraceae Family for Potential Biological Applications. *Antibiotics*, *12*(3): 543. DOI: 10.3390/antibiotics12030543.

Kamble, M. G., Singh, A., Singh, S. V., Kamble, M. G., Sagar, N. A., & Rani, N. (2025). Nanotechnology for encapsulation of bioactive components: a review. *Discover Food*, *5*(1): 116. DOI: 10.1007/s44187-025-00386-7.

Karam, T. K., Ortega, S., Ueda Nakamura, T., Auzély-Velly, R., & Nakamura, C. V. (2020). Development of chitosan nanocapsules containing essential oil of *Matricaria chamomilla* L. for the treatment of cutaneous leishmaniasis. *International Journal of Biological Macromolecules*, *162*: 199–208. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2020.06.149.

Khamsehpour, N., Hanifian, H., Nateghpour, M., Raeisi, A., Shabani, M., Hasanpour, G., Khezri, A., Dehdast, S. A., Farivar, L., & Shahsavari, S. (2025). Antiplasmodial Activity of Green-Synthesized MgO Nanoparticles Using *Achillea millefolium* Against Chloroquine-Resistant and-Sensitive *Plasmodium falciparum*. *Avicenna Journal of Medical Biotechnology*, *17*(4): 249. DOI: 10.18502/ajmb.v17i4.20071.

Khan, S., Wong, A., Zeb, S., Mortari, B., Villa, J. E. L., & Sotomayor, M. D. P. T. (2023). Characterization of polymeric nanoparticles. In N. Ali, M. Bilal, A. Khan, T. A. Nguyen & R. K. Gupta (Eds.), Smart Polymer Nanocomposites: Design, Synthesis, Functionalization, Properties, and Applications. [En línea]. Disponible en: https://www.sciencedirect.com/science/chapter/edited-volume/abs/pii/B9780323916110000037?via%3Dihub. Fecha de consulta: 18 de septiembre del 2026

Khattak, A., Ahmad, B., Rauf, A., Bawazeer, S., Farooq, U., Ali, J., Patel, S., El-Sharkawy, E. R., Ikram, R., & Linfang, H. (2019). Green synthesis, characterisation and biological evaluation of plant-based silver nanoparticles using *Quercus semecarpifolia* Smith aqueous leaf extract. *IET Nanobiotechnology*, *13*(1): 36–41. https://doi.org/10.1049/IET-NBT.2018.5063.

Konovalov, D. A. (2014). Polyacetylene Compounds of Plants of the Asteraceae Family (Review). *Pharmaceutical Chemistry Journal*, *48*(9): 613–631. https://doi.org/10.1007/s11094-014-1159-7.

Kostić, A., Janačković, P., Kolašinac, S. M., & Dajić Stevanović, Z. P. (2020). Balkans' Asteraceae Species as a Source of Biologically Active Compounds for the Pharmaceutical and Food Industry. *Chemistry & Biodiversity*, *17*(6): 36-41. DOI: 10.1002/cbdv.202000097.

Kour, K., Bandral, J. D., Sood, M., & Bashur, M. (2026). Nanoencapsulation in Food Systems: Techniques, Applications, Challenges and Future Perspectives. *Chemical Science Review and Letters*, *15*(57): 1–5. DOI:10.37273/chesci.cs1720561101.

Kozuharova, E., Malfa, G. A., Acquaviva, R., Spadaro, V., Ionkova, I., Statti, G., & Raimondo, F. M. (2026). The Wild Plants from the Family Asteraceae That Are Traditionally Used

for Food in Sicily and Bulgaria and Their Health Benefits. *Foods*, *15*(6): 988. DOI: 10.3390/foods15060988.

Kucharska, E., Wachura, D., Elchiev, I., Bilewicz, P., Gąsiorowski, M., & Pelech, R. (2025). Co-Fermentation of Dandelion Leaves (*Taraxaci folium*) as a Strategy for Increasing the Antioxidant Activity of Fermented Cosmetic Raw Materials—Current Progress and Prospects. *Applied Sciences*, *15*(16): 9021. DOI: 10.3390/app15169021.

Kustiawan, P. M., Syaifie, P. H., Siregar, K. A. A. K., Ibadillah, D., & Mardliyati, E. (2024). New insights of propolis nanoformulation and its therapeutic potential in human diseases. *ADMET and DMPK*, *12*(1): 1–26. DOI: 10.5599/ADMET.2128.

Lam, P. L., Kok, S. H. L., Bian, Z. X., Lam, K. H., Tang, J. C. O., Lee, K. K. H., Gambari, R., & Chui, C. H. (2014). D-glucose as a modifying agent in gelatin/collagen matrix and reservoir nanoparticles for *Calendula officinalis* delivery. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, *117*: 277–283. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2014.02.041.

Lessa, F. C. R., Grillo, C. H. B., Pinto, F. E., Lorençon, B. B., Martins, J. D. L., Bertolucci, S. K. V., Pinto, J. E. B. P., & Endringer, D. C. (2012). Efficacy of guaco mouthwashes (*Mikania glomerata* and *Mikania laevigata*) on the disinfection of toothbrushes. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, *22*(6): 1330–1337. DOI: 10.1590/S0102-695X2012005000115.

Lestari, U., Muhaimin, M., Chaerunisa, A. Y., & Sujarwo, W. (2023). Improved Solubility and Activity of Natural Product in Nanohybrid. *Pharmaceuticals*, *16*(12): 1701. DOI: 10.3390/ph16121701.

Lopes, B. A., Boscardin, P. D., & Campos, P. M. (2023). Development and Characterization of Nanoemulsion Containing Volatile Oil of *Matricaria recutita* L. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, *66*(Spe): e23230576. DOI: 10.1590/1678-4324-SSBFAR-2023230576.

López Estrada, D., Chang, W. Te, & Heinrich, M. (2025). From "traditional" to modern medicine: A medical and historical analysis of *Tagetes erecta* L. (Cempasúchil). *Journal of Traditional and Complementary Medicine*, *15*(1): 6–14. DOI: 10.1016/j.jtcme.2024.08.001.

Lv, Y., Li, W., Liao, W., Jiang, H., Liu, Y., Cao, J., Lu, W., & Feng, Y. (2024). Nano-Drug Delivery Systems Based on Natural Products. *International Journal of Nanomedicine*, *19*: 541–569. DOI: 10.2147/IJN.S443692.

Mailander, L. K., Lorenz, P., Bitterling, H., Stintzing, F. C., Daniels, R., & Kammerer, D. R. (2022). Phytochemical Characterization of Chamomile (*Matricaria recutita* L.) Roots and Evaluation of Their Antioxidant and Antibacterial Potential. *Molecules*, *27*(23): 8508. DOI: 10.3390/molecules27238508.

Mandim, F., Petropoulos, S. A., Dias, M. I., Pinela, J., Kostić, M., Soković, M., Santos-Buelga, C., Ferreira, I. C. F. R., & Barros, L. (2021). Phenolic composition and biological

properties of *Cynara cardunculus* L. var. *altilis* petioles: Influence of the maturity stage. *Antioxidants*, *10*(12): 1907. DOI: 10.3390/antiox10121907.

Marchese Robinson, R. L., Lynch, I., Peijnenburg, W., Rumble, J., Klaessig, F., Marquardt, C., Rauscher, H., Puzyn, T., Purian, R., Åberg, C., Karcher, S., Vriens, H., Hoet, P., Hoover, M. D., Hendren, C. O., & Harper, S. L. (2016). How should the completeness and quality of curated nanomaterial data be evaluated? *Nanoscale*, *8*(19): 9919–9943. DOI: 10.1039/C5NR08944A.

Martínez-González, R. E., Huerta Martínez, F. M., Neri Luna, C., & Barrientos Ramírez, L. (2024). Ethnobotany of the old neighborhoods from Guadalajara, Jalisco, Mexico: the use of medicinal plants. *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas*, *23*(1): 75–110. DOI: 10.37360/blacpma.24.23.1.6.

Mehdipour, A., Reza, M. A. S., Rasouli, A., Baravati, M. H. J., Jafari, G. A., & Heidari, F. (2024). Green synthesis of zinc nanoparticles by hydroalcoholic extract of lavender (*Lavandula stoechas* L.), characterization, and cytotoxic effects on human breast and colon cancer. *Scientific Reports*, *14*(1): 29543. DOI: 10.1038/S41598-024-81295-0.

Mei, B., Xie, H., Xing, H., Kong, D., Pan, X., Li, Y., & Wu, H. (2020). Changes of Phenolic Acids and Antioxidant Activities in Diploid and Tetraploid *Echinacea purpurea* at Different Growth Stages. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, *30*(4): 510–518. DOI: 10.1007/S43450-020-00069-7.

Mushtaq, A., Mohd Wani, S., Malik, A. R., Gull, A., Ramniwas, S., Ahmad Nayik, G., Ercisli, S., Alina Marc, R., Ullah, R., & Bari, A. (2023). Recent insights into Nanoemulsions: Their preparation, properties and applications. *Food Chemistry: X*, *18*: 100684. DOI: 10.1016/J.FOCHX.2023.100684.

Nature Nanotechnology. (2016). A matter of scale. *Nature Nanotechnology*, *11*(9): 733. DOI: 10.1038/NNANO.2016.180.

Nayak, A. K., Hasnain, M. S., Aminabhavi, T. M., & Torchilin, V. P. (2022). Chapter 1 - Nanovesicular systems in drug delivery. In A. K. Nayak, M. S. Hasnain, T. M. Aminabhavi, & V. P. Torchilin (Eds.), *Systems of Nanovesicular Drug Delivery* (pp. 1–15). Academic Press. DOI: 10.1016/B978-0-323-91864-0.00026-7.

Nguyen, T. T. N., Vo, T. T., Nguyen, B. N. H., Nguyen, D. T., Dang, V. S., Dang, C. H., & Nguyen, T. D. (2018). Silver and gold nanoparticles biosynthesized by aqueous extract of burdock root, *Arctium lappa* as antimicrobial agent and catalyst for degradation of pollutants. *Environmental Science and Pollution Research International*, 25(34): 34247–34261. DOI: 10.1007/s11356-018-3322-2.

Ojeda, G. A., Arias Gorman, A. M., & Sgroppo, S. C. (2019). Nanotecnología y su aplicación en alimentos. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, *12*(23): 1–18. DOI: 10.22201/ceiich.24485691e.

OMS, Organización Mundial de la Salud. (2019). *WHO Global report on traditional and complementary medicine 2019*. World Health Organization. Disponible en: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/312342/9789241515436-eng.pdf?ua=1. Fecha de consulta: 24 de febrero de 2026.

Onyeaka, H., Passaretti, P., Miri, T., & Al-Sharify, Z. T. (2022). The safety of nanomaterials in food production and packaging. *Current Research in Food Science*, 5: 763–774. DOI: 10.1016/J.CRFS.2022.04.005.

Osman, A. I., Zhang, Y., Farghali, M., Rashwan, A. K., Eltaweil, A. S., Abd El-Monaem, E. M., Mohamed, I. M. A., Badr, M. M., Ihara, I., Rooney, D. W., & Yap, P. S. (2024). Synthesis of green nanoparticles for energy, biomedical, environmental, agricultural, and food applications: A review. *Environmental Chemistry Letters*, *22*(2): 841–887. DOI: 10.1007/S10311-023-01682-3.

Palacios-Espinosa, J. F., Núñez-Aragón, P. N., Gomez-Chang, E., Linares, E., Bye, R., & Romero, I. (2021). Anti-*Helicobacter pylori* Activity of *Artemisia ludoviciana* subsp. *mexicana* and Two of Its Bioactive Components, Estafiatin and Eupatilin. *Molecules*, *26*(12): 3654. DOI: 10.3390/molecules26123654.

Panda, S. K., Da Silva, L. C. N., Sahal, D., & Leonti, M. (2019). Editorial: Ethnopharmacological studies for the development of drugs with special reference to Asteraceae. *Frontiers in Pharmacology*, *10*: 483288. DOI: 10.3389/fphar.2019.00955.

Paredes, A. J., Asensio, C. M., Llabot, J. M., Allemandi, D. A., & Palma, S. D. (2016). Nanoencapsulation in the food industry: manufacture, applications and characterization. *Journal of Food Bioengineering and Nanoprocessing*, *1*(1): 56–79.

Parveen, K., Banse, V., & Ledwani, L. (2016). Green synthesis of nanoparticles: Their advantages and disadvantages. *AIP Conference Proceedings*, *1724*(1): 020048. DOI: 10.1063/1.4945168.

Patel, S. B., & Sanap, D. P. (2026). Scaling up nanoformulation manufacturing: A multi-case study linking target product profiles, critical quality attributes, and quality by design. *OpenNano*, *28*: 100288. DOI: 10.1016/J.ONANO.2026.100288

Pathak, C., Vaidya, F. U., & Pandey, S. M. (2019). Mechanism for Development of Nanobased Drug Delivery System. In S. S. Mohapatra, S. Ranja, N. Dasgupta, R. K. Mishra & S. Thomas (Eds.), Applications of Targeted Nano Drugs and Delivery Systems: Nanoscience and Nanotechnology in Drug Delivery. [En línea]. Disponible en: https://www.sciencedirect.com/science/chapter/edited-volume/abs/pii/B978012814029100003X?via%3Dihub. Fecha de consulta 19 de septiembre del 2026

Pérez Hernández, R. A., Piñón Castillo, H. A., García Hernández, D. M., González Luna, A. R., Chávez Montes, A., Estrada Platas, K. L., & Gutiérrez Soto, J. G. (2025). Uso

agrícola de extractos vegetales nanoencapsulados en el control de fitopatógenos y poscosecha. *Revista Agro*, *3*(1): 1–32. DOI: 10.47633/x2m2x827

Pérez-Gutiérrez, S., Campos-Xolalpa, N., Estrada-Barajas, S. A., Carrasco-Carballo, A., Mendoza, A., & Sánchez-Mendoza, E. (2025). Anti-Inflammatory Activity of Two Labdane Enantiomers from *Gymnosperma glutinosum*: An In Vivo, In Vitro, and In Silico Study. *Pharmaceuticals*, *18*(4): 516. DOI: 10.3390/ph18040516.

Perumal, S., Atchudan, R., & Lee, W. (2022). A Review of Polymeric Micelles and Their Applications. *Polymers*, *14*(12): 2510. DOI: 10.3390/POLYM14122510.

Petrova, M., Miladinova-Georgieva, K., & Geneva, M. (2024). Influence of Abiotic and Biotic Elicitors on Organogenesis, Biomass Accumulation, and Production of Key Secondary Metabolites in Asteraceae Plants. *International Journal of Molecular Sciences*, *25*(8): 4197. DOI: 10.3390/IJMS25084197.

Piccinin, I. N., Zielinski, A. A. F., & Kuhnen, S. (2022). Invasive plant *Bidens pilosa* as an ecofriendly antibiofilm-antimicrobial against *Staphylococcus aureus* for bovine mastitis control. *Organic Agriculture*, *13*(1): 73–82. DOI: 10.1007/s13165-022-00415-0.

Pietroiusti, A., Stockmann-Juvala, H., Lucaroni, F., & Savolainen, K. (2018). Nanomaterial exposure, toxicity, and impact on human health. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Nanomedicine and Nanobiotechnology*, *10*(5): e1513. DOI: 10.1002/WNAN.1513.

Reimers, E. A. L., C., E. F., Reimers, D. J. L., Chaloupkova, P., Valle, J. M. Z. del, Milella, L., & Russo, D. (2019). An Ethnobotanical Survey of Medicinal Plants Used in Papantla, Veracruz, Mexico. *Plants*, *8*(8): 246. DOI: 10.3390/PLANTS8080246.

Rhayem, L., Boussetta, N., Kubo, M. T. K., Merlier, F., Vorobiev, E., & Lebovka, N. (2026). Bioactive Compounds from Dandelion (*Taraxacum officinale*): Advances in Extraction Techniques and Applications. *Foods*, *15*(4): 782. DOI: 10.3390/foods15040782.

Rizki, I. N., Astuti, W., Patmawati, P., Firmansyah, M. L., & Jiwanti, P. K. (2026). Extract-dependent size control of silver nanoparticles using tropical artisan tea extracts under identical green synthesis conditions. *South African Journal of Chemical Engineering*, 56: 100840. DOI: 10.1016/J.SAJCE.2026.100840.

Rodríguez-Chávez, J. L., Egas, V., Linares, E., Bye, R., Hernández, T., Espinosa-García, F. J., & Delgado, G. (2017). Mexican Arnica (*Heterotheca inuloides* Cass. Asteraceae: Astereae): Ethnomedical uses, chemical constituents and biological properties. *Journal of Ethnopharmacology*, *195*: 39–63. DOI: 10.1016/j.jep.2016.11.021.

Rodríguez-Hernández, A. A., Flores-Soria, F. G., Patiño-Rodríguez, O., & Escobedo-Moratilla, A. (2022). Sanitary Registries and Popular Medicinal Plants Used in Medicines and Herbal Remedies in Mexico (2001–2020): A Review and Potential Perspectives. *Horticulturae*, *8*(5): 377. DOI: 10.3390/horticulturae8050377.

Rodríguez-Landa, J. F., Cueto-Escobedo, J., Flores-Aguilar, L. Á., Rosas-Sánchez, G. U., Rovirosa-Hernández, M. de J., García-Orduña, F., & Carro-Juárez, M. (2018). The Aqueous Crude Extracts of *Montanoa frutescens* and *Montanoa grandiflora* Reduce Immobility Faster Than Fluoxetine Through GABAA Receptors in Rats Forced to Swim. *Journal of Evidence-Based Integrative Medicine*, *23*: 2515690X18762953. DOI: 10.1177/2515690X18762953.

Sahu, K., Kurey, R., & Pillai, A. K. (2024). Green synthesis of silver nanoparticles from *Manilkara zapota* leaf extract for the detection of aminoglycoside antibiotics and other applications. *RSC Advances*, *14*(32): 23240–23256. DOI: 10.1039/D4RA01906G.

Salehi, B., Selamoglu, Z., Sevindik, M., Fahmy, N. M., Al-Sayed, E., El-Shazly, M., Csupor-Loffler, B., Csupor, D., Yazdi, S. E., Sharifi-Rad, J., Arserim-Ucar, D. K., Arserim, E. H., Karazhan, N., Jahano, A., Dey, A., Azadi, H., Vakili, S. A., Sharopov, F., Martins, N., & Busselberg, D. (2020). *Achillea* spp.: A comprehensive review on its ethnobotany, phytochemistry, phytopharmacology and industrial applications. *Cellular and Molecular Biology*, *66*(4): 78–103. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32583790/

Salinas-Rodríguez, M. M., Sajama, M. J., Gutiérrez-Ortega, J. S., Ortega-Baes, P., & Estrada-Castillón, A. E. (2018). Identification of endemic vascular plant species hotspots and the effectiveness of the protected areas for their conservation in Sierra Madre Oriental, Mexico. *Journal for Nature Conservation*, *46*: 6–27. DOI: 10.1016/J.JNC.2018.08.012.

Sammasagi, S. P., Sutar, K. P., & Hooli, S. (2025). Scale-Up and Quality Control Challenges in the Industrial Manufacturing of Nanoformulations: Current Trends and Future Perspectives. *IJSAT - International Journal on Science and Technology*, *16*(2): 1-27. DOI: 10.71097/IJSAT.V16.I2.6473.

Sandhiya, V., & Ubaidulla, U. (2020). A review on herbal drug loaded into pharmaceutical carrier techniques and its evaluation process. *Future Journal of Pharmaceutical Sciences*, *6*(1): 51. DOI: 10.1186/s43094-020-00050-0.

Sanei-Dehkordi, A., Ghasemian, A., Zarenezhad, E., Qasemi, H., Nasiri, M., & Osanloo, M. (2023). Nanoliposomes containing three essential oils from the *Artemisia* genus as effective larvicides against *Aedes aegypti* and *Anopheles stephensi*. *Scientific Reports*, *13*(1): 11002. DOI: 10.1038/s41598-023-38284-6.

Sanjana, Priyadharshini, R., Rajeshkumar, S., & Anandan, J. (2025). Evaluation of Antimicrobial and Cytotoxic Effects of *Eclipta prostrata*-mediated Calcium Oxide Nanoparticle-incorporated Mouth Rinse. *Journal of Environmental Nanotechnology*, *14*(1): 63–68. DOI: 10.13074/jent.2025.03.243941.

Sansores-España, D., Pech-Aguilar, A. G., Cua-Pech, K. G., Medina-Vera, I., Guevara-Cruz, M., Gutiérrez-Solis, A. L., Reyes-García, J. G., & Avila-Nava, A. (2022). Plants Used in Mexican Traditional Medicine for the Management of Urolithiasis: A Review of

Preclinical Evidence, Bioactive Compounds, and Molecular Mechanisms. *Molecules*, *27*(6): 2008. DOI: 10.3390/molecules27062008.

Sapkota, B., & Kunwar, P. (2024). A Review on Traditional Uses, Phytochemistry and Pharmacological Activities of *Calendula officinalis* Linn. *Natural Product Communications*, 19(6)1: 22. DOI: 10.1177/1934578X241259021.

Sharma, A., Flores-Vallejo, R. del C., Cardoso-Taketa, A., & Villarreal, M. L. (2017). Antibacterial activities of medicinal plants used in Mexican traditional medicine. *Journal of Ethnopharmacology*, *208*: 264–329. DOI: 10.1016/j.jep.2016.04.045.

Sharma, M., Bithel, N., & Sharma, M. (2022). Ethnobotany, Phytochemistry, Pharmacology and Nutritional Potential of Medicinal Plants from Asteraceae Family. *Journal of Mountain Research*, 17(2): 67–83. DOI: 10.51220/jmr.v17i2.7.

Sharma, R., Bhattu, M., Tripathi, A., Verma, M., Acevedo, R., Kumar, P., Rajput, V. D., & Singh, J. (2023). Potential medicinal plants to combat viral infections: A way forward to environmental biotechnology. *Environmental Research*, *227*: 115725. DOI: 10.1016/j.envres.2023.115725.

Sharma, S., Bharti, R., Thakur, A., Sharma, R., & Verma, M. (2025). Eco-friendly Synthesis and Characterization of Bioactive Iron Oxide Nanoparticles Using *Tagetes erecta* Leaf Extract for Antioxidant and Anti-Corrosion Application. *Orbital: The Electronic Journal of Chemistry*, *17*(5): 444–455. DOI: 10.17807/orbital.v17i5.22919.

Singh, N. B., Kumar, B., Usman, U. L., & Susan, M. A. B. H. (2024). Nano revolution: Exploring the frontiers of nanomaterials in science, technology, and society. *Nano-Structures & Nano-Objects*, *39*: 101299. DOI: 10.1016/j.nanos.2024.101299.

Sun, S., Yu, Y., Jo, Y., Han, J. H., Xue, Y., Cho, M., Bae, S. J., Ryu, D., Park, W., Ha, K. T., & Zhuang, S. (2025). Impact of extraction techniques on phytochemical composition and bioactivity of natural product mixtures. *Frontiers in Pharmacology*, *16*: 1615338. DOI: 10.3389/FPHAR.2025.1615338.

Szopa, A., Pajor, J., Klin, P., Rzepiela, A., Elansary, H. O., Al-Mana, F. A., Mattar, M. A., & Ekiert, H. (2020). *Artemisia absinthium* L.—Importance in the History of Medicine, the Latest Advances in Phytochemistry and Therapeutic, Cosmetological and Culinary Uses. *Plants*, *9*(9): 1063. DOI: 10.3390/plants9091063.

Tamargo, B., Monzote, L., Piñón, A., Machín, L., García, M., Scull, R., & Setzer, W. N. (2017). In Vitro and In Vivo Evaluation of Essential Oil from *Artemisia absinthium* L. Formulated in Nanocochleates against Cutaneous Leishmaniasis. *Medicines*, *4*(2): 38. DOI: 10.3390/MEDICINES4020038.

Tran, X. T., Bien, T. T. L., Tran, T. Van, & Nguyen, T. T. T. (2024). Biosynthesis of ZnO nanoparticles using aqueous extracts of *Eclipta prostrata* and *Piper longum*: characterization and assessment of their antioxidant, antibacterial, and photocatalytic properties. *Nanoscale Advances*, *6*(19): 4885–4899. DOI: 10.1039/D4NA00326H.

Vargas, J., García, L., & Baena, Y. (2023). Nanotechnology and herbal products: Advances and perspectives in the treatment of diabetes and some of its complications. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, *13*(12): 001–014. DOI: 10.7324/JAPS.2023.147736.

Velázquez-Vázquez, G., Pérez-Armendáriz, B., Ortega-Martínez, L. D., & Nelly-Juarez, Z. (2019). Ethnobotanical knowledge on the use of medicinal plants in the sierra negra de puebla, Mexico. *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas*, *18*(3): 265–276. DOI: 10.37360/blacpma.19.18.3.17.

Velgosova, O., Dolinská, S., Podolská, H., Mačák, L., & Čižmárová, E. (2024). Impact of Plant Extract Phytochemicals on the Synthesis of Silver Nanoparticles. *Materials*, *17*(10): 2252. DOI: 10.3390/MA17102252.

Verekar, R., Dessai, S., Ayyanar, M., Nadaf, S., & Gurav, S. (2024). Nanocochleates: Revolutionizing lipid-based drug delivery with enhanced bioavailability, a review. *Hybrid Advances*, *6*: 100215. DOI: 10.1016/J.HYBADV.2024.100215.

Villaseñor, J. L. (2004). Los Géneros de plantas vasculares de la flora de México. *Botanical Sciences*, *75*: 105–135. DOI: 10.17129/botsc1.1694.

Villaseñor, J. L. (2016). Checklist of the native vascular plants of México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, *87*: 559–902. DOI: 10.1016/j.rmb.2016.06.017.

Villaseñor, J. L. (2018). Diversidad y distribución de la familia Asteraceae en México. *Botanical Sciences*, *96*(2): 332–358. DOI: 10.17129/botsc1.1872.

Wang, H., Leeuwenburgh, S. C. G., Li, Y., & Jansen, J. A. (2012). The use of micro- and nanospheres as functional components for bone tissue regeneration. *Tissue Engineering - Part B: Reviews*, *18*(1): 24–39. DOI: 10.1089/TEN.TEB.2011.0184.

Yien, R. M. K., Matos, A. P. dos S., Gomes, A. C. C., Garófalo, D. de A., Santos-Oliveira, R., Simas, N. K., & Ricci-Júnior, E. (2023). Nanotechnology Promoting the Development of Products from the Biodiversity of the Asteraceae Family. *Nutrients*, *15*(7): 1610. DOI: 10.3390/nu15071610.

Younas, M., Drouet, S., Nadeem, M., Giglioli-Guivarc'h, N., Hano, C., & Abbasi, B. H. (2018). Differential accumulation of silymarin induced by exposure of *Silybum marianum* L. callus cultures to several spectres of monochromatic lights. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, *184*: 61–70. DOI: 10.1016/J.JPHOTOBIOL.2018.05.018.

Zapata-Morales, J. R., Alonso-Castro, A. J., Domínguez, F., Carranza-Álvarez, C., Isiordia-Espinoza, M., Hernández-Morales, A., & Solorio-Alvarado, C. (2017). The antinociceptive effects of a standardized ethanol extract of the *Bidens odorata* Cav (Asteraceae) leaves are mediated by ATP-sensitive K^+ channels. *Journal of Ethnopharmacology*, *207*: 30–33. DOI: 10.1016/j.jep.2017.06.021.

Zarate-Escobedo, J., Castañeda-González, E. L., Cuevas-Sánchez, J. A., Carrillo-Fonseca, C. L., Ortiz-Torres, C., Ibarra-Estrada, E., & Serrato-Cruz, M. A. (2018). Essential oil of some populations of *Tagetes lucida* Cav. from the Northern and Southern regions of the State of Mexico. *Revista Fitotecnia Mexicana*, *41*(2): 199–209. DOI: 10.35196/rfm.2018.2.199-209.

REVISIÓN

UNA REVISIÓN DEL USO DE FIBRAS LIGNOCELULÓSICAS EN LA FABRICACIÓN DE EMPAQUES ALIMENTICIOS

A REVIEW OF THE USE OF LIGNOCELLULOSIC FIBERS IN THE MANUFACTURE OF FOOD PACKAGING

VALENCIA BERMÚDEZ, Susana[1]

JARDÓN MAXIMINO, Nohemí[2]

GUTIÉRREZ NAVA, Manuel[2]

1. Centro Universitario Tianguistenco, Universidad Autónoma del Estado de México. Tianguistenco, Estado de México, México.

2. CIATEQ, A.C. Centro de Tecnología Avanzada, Unidad Estado de México. Lerma de Villada, Estado de México, México.

RESUMEN

En México, el sector de empaques para alimentos consume cerca del 47 % de los plásticos de origen petroquímico no biodegradables, lo que genera un alto volumen de residuos y un impacto ambiental. En este contexto, los biopolímeros reforzados con fibras lignocelulósicas emergen como una alternativa viable, debido a su potencial para reducir dicho impacto sin comprometer la funcionalidad de los empaques. El presente artículo ofrece una revisión general de la manufactura de empaques para alimentos basados en biocompuestos, abordando los principales biopolímeros y fibras lignocelulósicas empleados para este fin. Asimismo, se analizan la clasificación, composición y propiedades mecánicas de estas fibras, su papel como refuerzo y los tratamientos (físicos y químicos) empleados para mejorar su compatibilidad con biopolímeros.

Palabras clave: fibras lignocelulósicas; biocompuestos; materiales biodegradables; manufactura de empaque alimenticio.

ABSTRACT

In Mexico, the food packaging sector accounts for approximately 47 % of the consumption of non-biodegradable, petrochemical-based plastics, generating a high volume of waste and a significant environmental impact. In this context, biopolymers reinforced with lignocellulosic fibers have emerged as a promising alternative, as they can reduce this impact without compromising packaging functionality. This article provides an overview of the manufacturing of biocomposite-based food packaging, addressing the main biopolymers and lignocellulosic fibers used for this purpose. It also examines the classification,

Correspondencia
svalenciab@uaemex.mx
https://orcid.org/0009-0009-2233-6545

Fecha de recepción
19 de noviembre de 2025.
Fecha de aceptación
26 de septiembre de 2026.

composition, and mechanical properties of these fibers, their role as reinforcement, and the physical and chemical treatments used to enhance their compatibility with biopolymers.

***Keywords**: lignocellulosic fibers; biocomposites; biodegradable materials; manufacture of food packaging.*

INTRODUCCIÓN

La creciente preocupación por el impacto ambiental que generan los residuos plásticos, aunada con la disponibilidad limitada de los recursos fósiles, ha impulsado la búsqueda de materiales sostenibles que provengan de fuentes renovables y presenten capacidad de biodegradarse (Orue et al, 2018).

En 2025, la industria del envasado y embalaje de alimentos representa una parte importante del mercado mundial de plásticos, con un volumen de aproximadamente el 52 %. Los envases flexibles como películas y envolturas representan alrededor del 35 % del uso de plásticos, mientras que los envases rígidos hacen uso del 17 % (Tamaño Del Mercado de Polímeros, Participación, Crecimiento y Análisis de La Industria, Información Regional y Pronóstico para 2034, 2025). Este elevado consumo de plásticos resulta preocupante, ya que una gran parte de estos materiales termina en vertederos y solo el 9 % se recupera y se recicla.

Recientemente se ha comenzado a incorporar bioplásticos a la fabricación de empaques para alimentos. Estos materiales se elaboran a partir de recursos naturales y pueden obtenerse mediante procesos biológicos o químicos. En particular, los bioplásticos, como el PLA, pueden biodegradarse, lo que los convierte en una excelente alternativa para la fabricación de empaques y envases más respetuosos con el medio ambiente.

En este sentido, el desarrollo de bioplásticos y de materiales compuestos reforzados con fibras lignocelulósicas se perfila como una alternativa tecnológica prometedora para reducir el impacto ambiental de los empaques. La incorporación de este tipo de fibras permite incrementar la rigidez del material compuesto, reducir los costos de producción y, además, mejorar propiedades específicas, como el comportamiento térmico y la actividad antimicrobiana (Mohammed et al., 2015).

En este contexto, el presente artículo tiene como objetivo analizar el potencial de las fibras lignocelulósicas para el desarrollo de empaques alimenticios. Para ello, se presenta una revisión de las características básicas asociadas a la manufactura de empaques sostenibles, así como de la clasificación, composición, propiedades y tratamientos destinados a promover la compatibilidad entre las fibras lignocelulósicas y los biopolímeros. Asimismo, se revisan los procesos empleados en la fabricación de empaques alimenticios.

MATERIALES COMPUESTOS BASADOS EN BIOPOLÍMEROS Y FIBRAS LIGNOCELULÓSICAS PARA APLICACIONES DE EMPAQUE

Los materiales compuestos son sistemas que están formados por la integración física de dos o más materiales, los cuales difieren en su composición, propiedades y, en algunos casos, en su morfología, dando lugar a una estructura cohesionada cuyas propiedades son superiores a las que cada material podría ofrecer de manera individual (Chandramohan et al., 2011).

En el desarrollo de empaques alimenticios, se ha impulsado el diseño de soluciones más sostenibles mediante la incorporación de fibras lignocelulósicas en matrices poliméricas biodegradables (Mallick, 2007). La figura 1 muestra un ejemplo de un envase alimenticio elaborado a partir de un biopolímero de ácido poliláctico (PLA) reforzado con fibras lignocelulósicas cortas, en el que las fibras actúan como material de refuerzo dentro del biopolímero.

Estudios recientes han evidenciado que los biopolímeros reforzados con fibras lignocelulósicas pueden prolongar la frescura de los alimentos al mejorar la resistencia mecánica y las propiedades de barrera del envase, además de ofrecer alternativas reutilizables frente a envases tradicionales y favorecer la degradación en ambientes controlados, reforzando su potencial como soluciones sostenibles para el sector alimenticio (Berthet et al., 2015; Ochoa-Yepes et al., 2018).

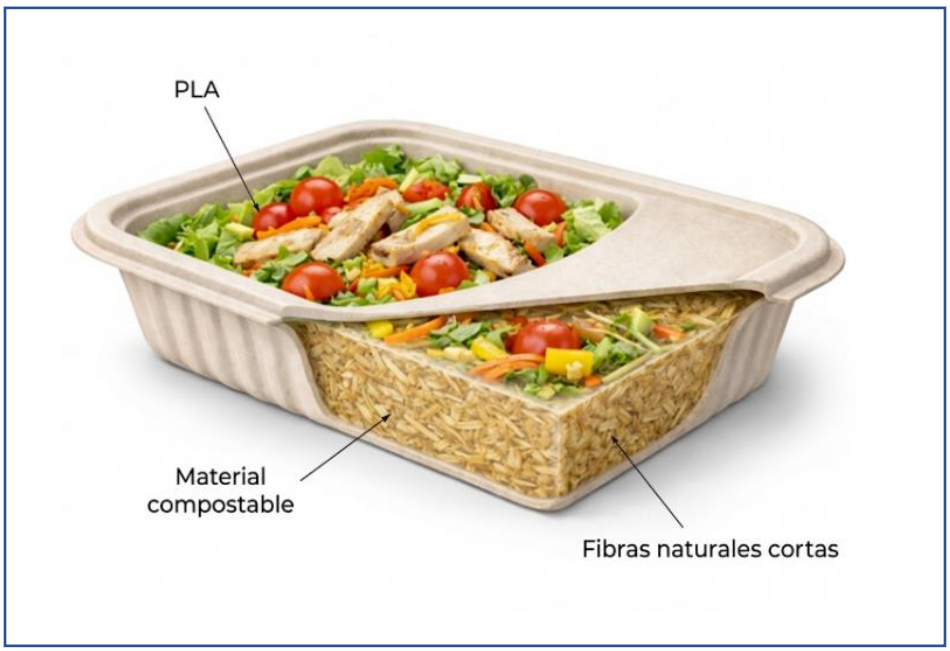


Figura 8. Ejemplo de envase alimenticio a partir de biocompuesto (creado con IA)

Los *materiales compuestos de base biológica (biocompuestos)* pueden clasificarse en tres categorías según el origen de la matriz y del refuerzo: (1) polímeros derivados del petróleo no biodegradables reforzados con fibras naturales, que reducen el uso de recursos fósiles; (2) polímeros de origen biológico reforzados con fibras sintéticas, que combinan matrices renovables con refuerzos convencionales para mejorar el desempeño mecánico; y (3) polímeros de origen biológico reforzados con fibras naturales, formados por componentes renovables (Mitra, 2014). Esta última categoría, conocida como *biocompuestos verdes*, es la opción más prometedora, debido a su renovabilidad, menor huella ambiental y, en muchos casos, capacidad de biodegradación o compostaje (Mansor et al., 2015).

FIBRAS LIGNOCELULÓSICAS: COMPOSICIÓN, CLASIFICACIÓN Y PROPIEDADES

Las fibras lignocelulósicas son materiales naturales que conforman la estructura básica de las plantas y se obtienen de tejidos como tallos, cáscaras, bagazos o residuos agrícolas (Chandramohan et al., 2011). Estas fibras se

consideran refuerzos naturales ampliamente utilizados en la fabricación de biocompuestos.

La figura 2 muestra una clasificación general de las fibras lignocelulósicas, así como ejemplos representativos de cada tipo.

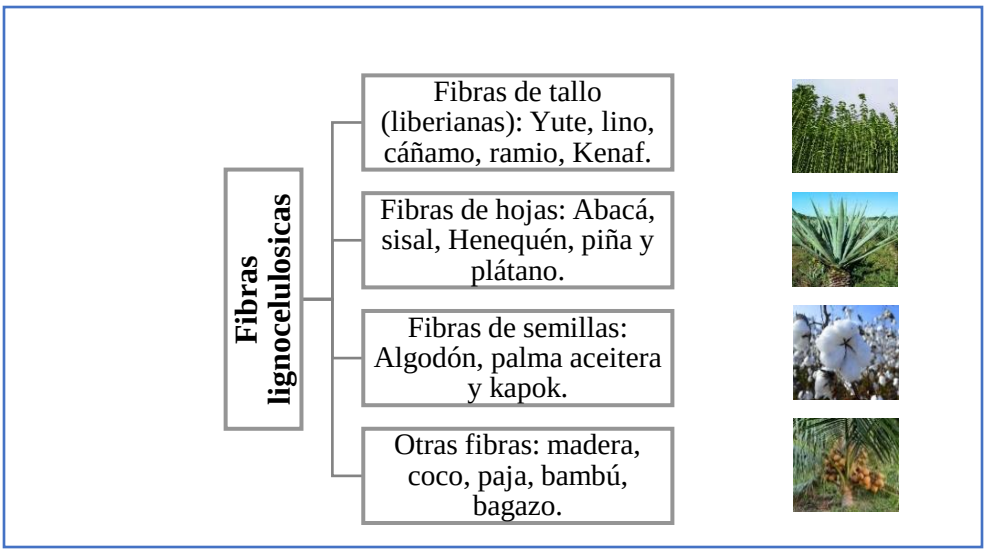


Figura 9. Clasificación de fibras lignocelulosicas (modificado, Ali et al., 2021)

Las fibras lignocelulósicas están constituidas principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, además de pequeñas cantidades de pectinas, ceras y otros extractivos, que les confieren propiedades específicas.

La celulosa es un polímero natural compuesto por unidades de D-glucosa unidas mediante enlaces β-1,4, formando cadenas largas y altamente cristalinas que confieren a las fibras una elevada resistencia mecánica, especialmente a la tracción (Biagiotti et al., 2004). La hemicelulosa presenta una estructura más flexible y desordenada, lo que la hace sensible a la humedad y propensa a cambios dimensionales, mientras que la lignina actúa como un componente protector al aportar resistencia al ataque microbiano y estabilidad al material.

Tanto la lignina como la hemicelulosa actúan como un pegamento natural que une y estabiliza las capas y microfibrillas de celulosa, aportando cohesión y cierta flexibilidad estructural a la pared celular vegetal.

Un esquema representativo de la composición de la fibra se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y en la tabla 1 se presentan

la composición y las propiedades mecánicas de algunas fibras lignocelulósicas.

Las ventajas de usar fibras lignocelulósicas son que son biodegradables, renovables, abundantes y de bajo costo. Al final de su vida útil, los compuestos reforzados con fibras pueden incinerarse o disponerse sin generar un incremento neto de CO_2, ya que el carbono liberado corresponde al absorbido durante el crecimiento de la planta.

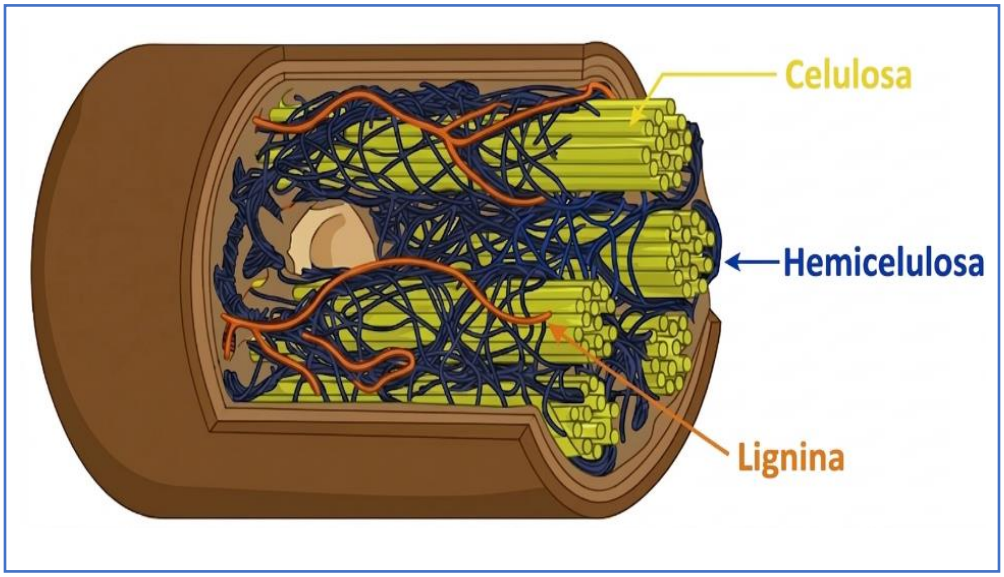


Figura 10. Composición de las fibras lignocelulósicas (creada con IA)

BIOPOLÍMEROS SINTÉTICOS Y DE ORIGEN NATURAL

Entre los biopolímeros utilizados como matrices poliméricas para el desarrollo de biocompuestos destinados a empaques alimenticios se encuentran tanto los sintéticos como los naturales.

Tabla 4. Composición y propiedades mecánicas de algunas fibras vegetales (Biagiotti et al., 2004).

	Composición				Propiedades
Fibra	Celulosa (%)	Hemi-celulosa (%)	Lignina (%)	Pectina (%)	Resistencia a la tensión (MPa)
Lino	60–81	14–18.6	2–3	1.8–2.3	343–1035
Yute	51–72	12–20.4	5–13	0.2	187–773
Abacá	60.8–64	21	12	0.8	980
Sisal	43–88	10–13	4–12	0.8–2	507–855
Kenaf	36	21	18	2	295–930
Ramio	68.6–76	13.1–15.0	0.6–1	1.9–2	400–938
Cáñamo	70–78	17.9–22	3.7–5	0.9	580–1110
Algodón	82.7–92	2–5.7	0.5–1	5.7	287–597
Fibra de coco	43	0.3	45	4.0	106–270
Plátano	60–65	6–19	5–10	3–5	529–914
Henequén	60–78	4–28	8–13	3–4	430–580
Bagazo	40	30	20	10	20–290
Piña	80–81	16–19	12	2–2.5	170–1627

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta una clasificación de los biopolímeros según su origen, su tipo de síntesis y sus características de degradación. Estos biopolímeros pueden provenir de recursos fósiles o renovables; sin embargo, su impacto ambiental no depende solo de su origen, sino también de sus procesos de producción y degradación. Algunos polímeros de origen fósil son biodegradables, tales como PCL (poli(ε-caprolactona)), PBAT (poli(butileno adipato-tereftalato)) o PBSA (poli(butileno succinato-adipato)) (PHAs), mientras que ciertos polímeros renovables como el Bio-PE (biopolietileno) y Bio-PP (biopolipropileno) no lo son. Los biopolímeros de origen renovable pueden sintetizarse químicamente, como el ácido poliláctico (PLA), o producirse de forma natural, como polisacáridos (quitina, quitosano, almidón, celulosa), proteínas (colágeno, gluten, gelatina) y polihidroxialcanoatos, lo que evidencia que la sostenibilidad resulta de la combinación entre el origen, la fabricación y el destino final del material.

Lo anterior ha impulsado el desarrollo de mezclas de biopolímeros orientadas a mejorar sus propiedades y a optimizar su degradabilidad en condiciones controladas (Samanez et al., 2026; Zhao et al., 2026).

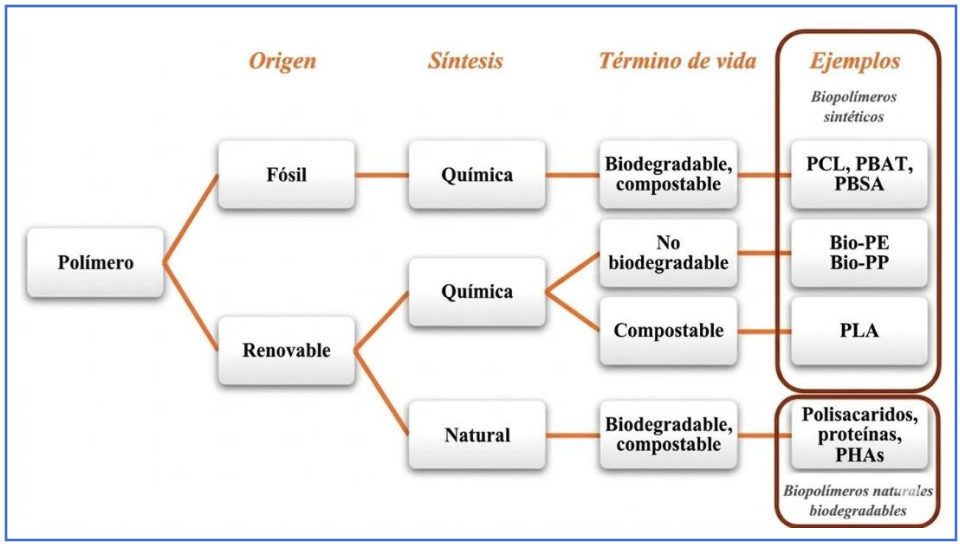


Figura 11. Biopolímeros sintéticos y totalmente naturales (Berthet et al., 2015)

MANUFACTURA DE EMPAQUES ALIMENTICIOS BASADOS EN BIOPOLÍMEROS Y FIBRAS LIGNOCELULÓSICAS

La manufactura de empaques alimenticios a partir de biocompuestos basados en biopolímeros y fibras lignocelulósicas depende de diversas decisiones técnicas que determinan su desempeño final.

La selección del biopolímero, la fibra natural y sus tratamientos aplicados, así como el método de procesamiento influyen directamente en propiedades como la resistencia mecánica, la estabilidad frente a la humedad y la vida útil del alimento; estos aspectos se resumen en la figura 5.

La elección del biopolímero define tanto el método de procesamiento como parte de las propiedades del empaque alimenticio. La temperatura de procesamiento del biopolímero no debe superar la de degradación de las fibras lignocelulósicas. Además, dado que el biopolímero actúa como matriz continua, es necesario evaluar su compatibilidad con las fibras. Debido a la naturaleza hidrofílica de las fibras lignocelulósicas, se favorece una buena adhesión interfacial al emplear biopolímeros hidrofílicos. En contraste, si el biopolímero es hidrofóbico, es necesario establecer estrategias que

promuevan la compatibilidad entre ambos componentes (Salwa et al., 2019; Summerscales et al., 2010).

Por su parte, la selección de las fibras lignocelulósicas depende de sus propiedades, que están directamente influidas por su composición química. Un alto contenido de celulosa proporciona mayor rigidez y resistencia mecánica, mientras que un mayor contenido de lignina favorece la estabilidad frente a la humedad. Estas propiedades influyen en el comportamiento del empaque, tales como la resistencia mecánica, la estabilidad dimensional, la permeabilidad al vapor de agua y gases, así como la adhesión interfacial con la matriz polimérica (Pickering et al., 2016).

Las fibras lignocelulósicas requieren un acondicionamiento previo para un procesamiento adecuado del biocompuesto. Para ello, se emplean tratamientos físicos y/o químicos. Entre los tratamientos químicos, el tratamiento alcalino es uno de los más utilizados, ya que mejora la estabilidad térmica de las fibras mediante la eliminación de componentes de baja estabilidad y la limpieza de las ceras e impurezas presentes en su superficie.

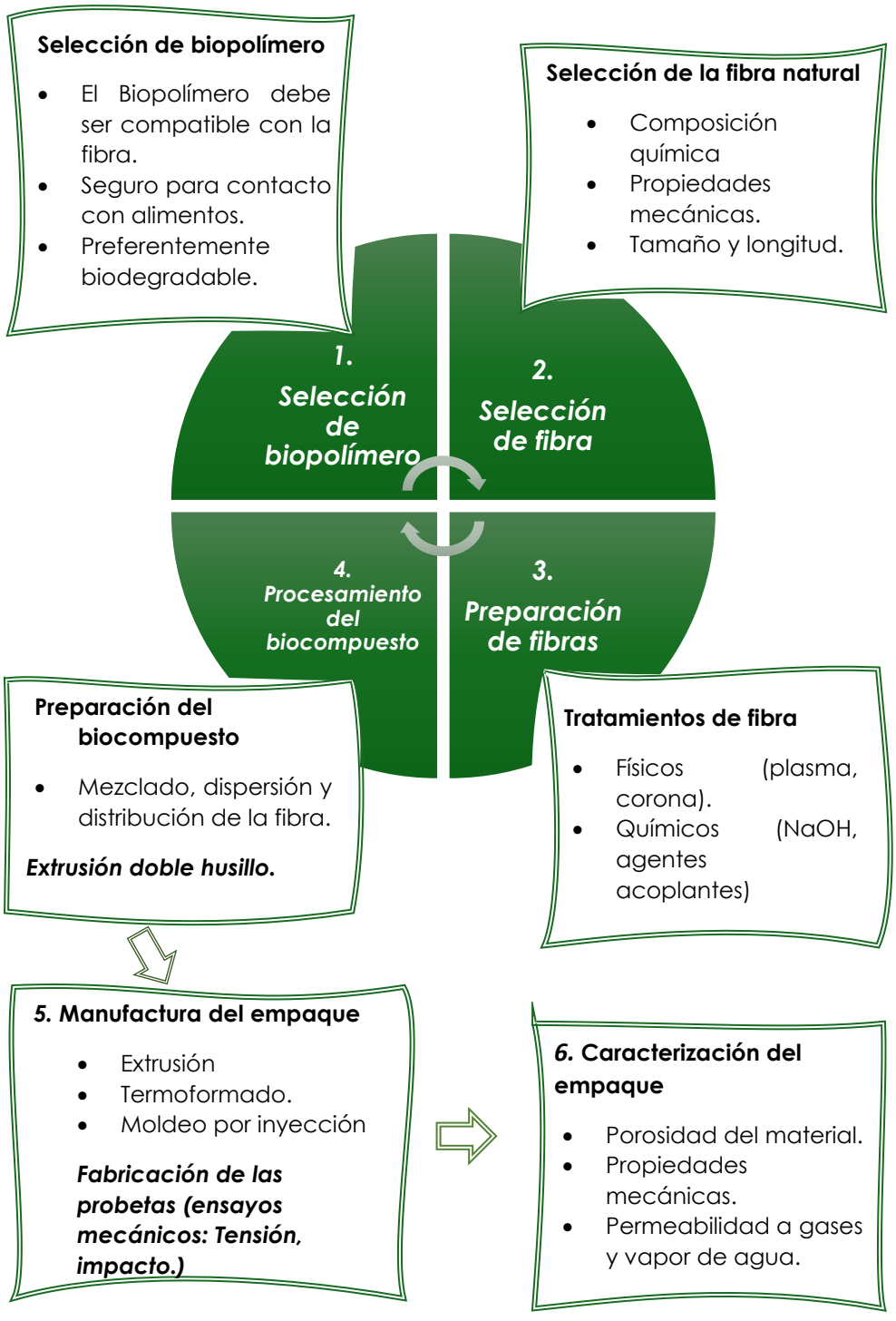


Figura 12. Consideraciones para la manufactura de un empaque alimenticio (Fuente propia).

Asimismo, para mejorar la compatibilidad con matrices hidrofóbicas, se suele modificar su superficie mediante tratamientos con silanos, anhídrido maleico, entre otros (Kabir et al., 2012). En cuanto a los tratamientos físicos, destacan el tratamiento corona y el plasma, los cuales modifican la energía superficial y la estructura de las fibras, favoreciendo su interacción con matrices hidrofóbicas (Faruk et al., 2012). O bien, durante el procesamiento, se puede incorporar un agente compatibilizante. Por ejemplo, la lignina, es un biopolímero que puede modificarse químicamente para emplearse como compatibilizante en biocompuestos (Chelliah et al., 2023).

El procesamiento del biocompuesto se realiza comúnmente mediante extrusoras de doble husillo, que permiten un mezclado intensivo de los componentes. No obstante, este proceso debe optimizarse para lograr un equilibrio entre una adecuada dispersión de las fibras en la matriz polimérica y la preservación de su integridad estructural (Pickering et al., 2016). En esta etapa se obtienen probetas del biocompuesto para su caracterización mecánica, así como para evaluar la porosidad y la permeabilidad a gases y al vapor de agua.

Finalmente, la manufactura del empaque alimenticio depende de factores como el tipo de biopolímero, el diseño del empaque (por ejemplo, películas, piezas moldeadas o blísteres) y el volumen de producción. En función de estos aspectos, se pueden emplear tecnologías como el moldeo por inyección, la extrusión-soplo y el termoformado (Faruk et al., 2012; Sain et al., 2008).

CONCLUSIONES

Los biocompuestos basados en biopolímeros y fibras lignocelulósicas constituyen una alternativa viable para el desarrollo de empaques alimenticios más amigables con el medio ambiente, sin comprometer su funcionalidad. La adecuada selección de los componentes, los tratamientos aplicados a las fibras y el método de procesamiento son factores que, en conjunto, determinan su desempeño. No obstante, aún persisten retos asociados a la optimización de procesos a escala industrial. En este sentido, las perspectivas futuras se orientan al desarrollo de biopolímeros o mezclas de biopolímeros con mejores prestaciones, a tratamientos más eficientes en las fibras, así como a estrategias de procesamiento que mejoren el desempeño de los empaques. Se prevé que la valorización de residuos lignocelulósicos y el diseño de

empaques con funcionalidades avanzadas sean líneas de investigación y desarrollo tecnológico con un enfoque de economía circular.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al CIATEQ A.C., Centro de Tecnología Avanzada, por las facilidades y el apoyo brindados durante la estancia de investigación con folio EESP2025-0095 del programa Investigadoras e Investigadores COMECYT. Se agradece al COMECYT el apoyo otorgado mediante la asignación de una beca del programa Investigadoras e Investigadores.

REFERENCIAS

Ali, H., Alghtani, A., Felemban, B., Abdel-Aziz, K., Saber, D., Ahmed, E., Megahed, M., & Fotouhi, M. (2021). Multivariable analysis for selection of natural fibers as fillers for a sustainable food packaging industry. *Materials Research Express*, *8*: 095504 https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac17a9

Berthet, M.-A., Angellier-Coussy, H., Guillard, V., & Gontard, N. (2015). Vegetal fiber-based biocomposites: Which stakes for food packaging applications? *Journal of Applied Polymer Science*, *133*: 42528 https://doi.org/10.1002/app.42528

Berthet, M.-A., Angellier-Coussy, H., Machado, D., Hilliou, L., Stäbler, A., Vicente, A., & Gontard, N. (2015). Exploring the potentialities of using lignocellulosic fibres derived from three food by-products as constituents of biocomposites for food packaging. *Industrial Crops and Products*, *69*: 110–122. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.01.028

Biagiotti, J., Puglia, D., & Kenny, J. M. (2004). A review on natural fiber-based composites-part I: structure, processing and properties of vegetable fibers. *Journal of Natural Fibers*, *1*(2): 37–68. https://doi.org/10.1300/J395v01n02_04

Chandramohan, D., & Marimuthu, K. (2011). A review on natural fibers. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, *8*(2): 194–206.

Chelliah, R., Wei, S., Vijayalakshmi, S, Kannan, B., Sultan, G., Liu, S., & Oh, D.-H. (2023). A comprehensive Mini-Review on Lignin-Based Nanomaterials for Food Applications: Systemic Advancement and Future Trends. *Molecules*, *28:* 6470. https://doi.org/10.3390/molecules28186470

Faruk, O., Bledzki, A.K., Fink, H.-P., & Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. *Progress in Polymer Science*, *37*: 1552–1596. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003

Kabir, M. M., Wang, H., Lau, K. T., & Cardona, F. (2012). Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview. *Composites Part B: Engineering*, *43*(7): 2883–2892. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.04.053

Mallick, P. K. (2007). *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, And Design (3rd ed.)*. CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781420005981

Mansor, M. R., Salit, M. S., Zainudin, E. S., Aziz, N. A., & Ariff, H. (2015). Life cycle assessment of natural fiber polymer composites. In S. Hakeem, M. Jawaid, & U. Rashid (Eds.), *Agricultural biomass based potential materials* (pp. 121–141). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-13847-3_6

Mitra, B. C. (2014). Environment friendly composite materials: Biocomposites and green composites. *Defence Science Journal*, *64*(3): 244–261.

Mohammed, L., Ansari, M. N. M., Pua, G., Jawaid, M., & Islam, M. S. (2015). A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composite and Its Applications. *International Journal of Polymer Science*: 243947. https://doi.org/10.1155/2015/243947

Orue, A., Eceiza, A., & Arbelaiz, A. (2018). Preparation and characterization of poly(lactic acid) plasticized with vegetable oils and reinforced with sisal fibers. *Industrial Crops and Products*, *112*: 170–180. https://doi.org/10.1016/J.indcrop.2017.11.011

Pickering, K. L., Efendy, M. G. A., & Le, T. M. (2016). A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *83*: 98–112. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.038

Sain, M., & Pervaiz, M. (2008). Mechanical properties of wood-polymer composites. In K. Oksman Niska & M. Sain (Eds.), *Wood-polymer composites* (pp. 101–127). Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1533/9781845694579.101

Salwa, H. N., Sapuan, S. M., Mastura, M. T., & Zuhri, M. Y. M. (2019). Green biocomposites for food packaging. *International Journal of Recent Technology and Eng*ineering, *8*(2): 450–459.

Samanez, C., Huamán Carrión, M., Palomino-Rincón, H., Taipe-Pardo, F., Moscoso-Moscoso, E., Cabel-Moscoso, D., Garcia-Espinoza, A., Huamaní, D., Plasencia, J., Martinez-Hernandez, J., Luciano Alipio, R., & Apaza-Cruz, J. (2026). Sustainable biopolymers for environmental applications: Advances and future perspectives toward a circular economy. *Polymers*, *18*: 618. https://doi.org/10.3390/polym18050618

Summerscales, J., Dissanayake, N. P. J., Virk, A. S., & Hall, W. (2010). A review of bast fibres and their composites. Part 1–Fibres as reinforcements. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *41*(10): 1329–1335. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.06.001

Tamaño del mercado de polímeros, participación, crecimiento y análisis de la industria, por tipo (termoplásticos, termoestables, elastómeros), por aplicación (embalaje, electrónica, alimentos, petroquímicos, atención médica, edificación y construcción, electrónica y comunicaciones, transporte), información regional y pronóstico para 2034. (2025, November 24). https://www.industryresearch.biz/Es/Market-Reports/Polymers-Market-107897.

Zhao, W., Qiu, R., Fang, M., Lei, W., & Chen, Y. (2026). Investigations on the performances of Corn Starch/PBAT Blends. *Polymers*, *18*(6): 767. https://doi.org/10.3390/polym18060767

ENERGÍA EÓLICA Y AEROGENERADORES: LA REVOLUCIÓN VERDE IMPULSADA POR EL VIENTO

WIND ENERGY AND WIND TURBINES: THE GREEN REVOLUTION DRIVEN BY WIND

ZÚÑIGA AVILÉS, Dalia

MARTÍNEZ LÓPEZ, Miguel

TÉLLEZ LÓPEZ, Antonio

RESUMEN

El uso de combustibles fósiles, como el carbón y el gas natural, para la generación de electricidad produce grandes cantidades de gases de efecto invernadero, principalmente dióxido de carbono (CO_2), que contribuyen al calentamiento global, un fenómeno que impulsa el cambio climático. Una forma de mitigar el impacto ambiental del sector eléctrico es impulsar una transición energética hacia fuentes renovables, entre las que destaca la energía eólica. Esta fuente energética ha acompañado a la humanidad desde hace más de tres mil años: los antiguos egipcios ya aprovechaban la fuerza del viento para impulsar embarcaciones, y en la Edad Media se utilizaba para accionar molinos. Sin embargo, no fue sino hasta 1887 cuando el viento se empleó por primera vez para generar electricidad, mediante la construcción del primer aerogenerador. La energía eólica aprovecha la energía cinética del viento para producir electricidad por medio de aerogeneradores, dispositivos diseñados para transformar el movimiento del aire en energía eléctrica. Aunque existen diferentes tipos, todos comparten cuatro componentes fundamentales: el rotor, el sistema de transmisión, el generador eléctrico y el sistema de control. Los aerogeneradores se clasifican según diversos criterios: a) por la orientación de su eje, pueden ser de eje horizontal o de eje vertical; b) por su potencia, se dividen en microeólicos, minieólicos y de gran escala; y c) por su ubicación, pueden ser terrestres (onshore) o marinos (offshore). Actualmente, la energía eólica es una tecnología madura que genera alrededor del 8.1 % de la electricidad mundial, mientras que en México su participación alcanza el 5.9 %. A pesar de su crecimiento sostenido, este sector enfrenta diversos desafíos, entre ellos incrementar la eficiencia de los aerogeneradores, reducir su impacto en la biodiversidad, disminuir el ruido y el efecto visual en el paisaje, así como optimizar la gestión y el reciclaje de los materiales al final de su vida útil.

Palabras clave: *energía eólica; aerogeneradores; capacidad instalada.*

División de Ingeniería Industrial e Ingeniería en Energía y Desarrollo Sostenible, Universidad Politécnica del Valle de Toluca. Almoloya de Juárez, Estado de México, México.

Correspondencia
miguel.martinez@upvt.edu.mx
https://orcid.org/0000-0002-3800-9719

Fecha de recepción
19 de noviembre de 2025.
Fecha de aceptación
26 de septiembre de 2026.

Este artículo fue sometido a revisión por pares doble ciego

ABSTRACT

The use of fossil fuels, such as coal and natural gas, for electricity generation produces large amounts of greenhouse gases, primarily carbon dioxide (CO_2), which contribute to global warming, the main driver of climate change. One way to mitigate the environmental impact of the electricity sector is to promote an energy transition toward renewable sources, among which wind energy stands out. Wind energy has been utilized by humanity for more than three thousand years. The ancient Egyptians harnessed wind power to propel boats, and during the Middle Ages, it was used to operate mills. However, it was not until 1887 that wind was first used to generate electricity with the construction of the first wind turbine. Wind energy converts the kinetic energy of moving air into electricity through wind turbines, devices designed to transform airflow into electrical power. Although there are different types of wind turbines, they all share four fundamental components: the rotor, the transmission system, the electric generator, and the control system. Wind turbines can be classified according to several criteria: (a) by axis orientation, as horizontal-axis or vertical-axis; (b) by power capacity, as micro, mini, or large-scale; and (c) by installation location, as onshore or offshore. Wind energy is now a mature technology, generating approximately 8.1 % of the world's electricity. In Mexico, its share reaches 5.9 %. Despite its sustained growth, the sector faces several challenges, including improving turbine efficiency, reducing impacts on biodiversity, minimizing noise and visual effects on the landscape, and optimizing material management and recycling at the end of turbine life.

Keywords: *wind energy; wind turbines; installed capacity.*

INTRODUCCIÓN

Para mantener el estilo de vida actual y llevar a cabo nuestras actividades cotidianas, se requiere la producción de grandes cantidades de energía, principalmente energía eléctrica. Esta energía es esencial para producir, conservar y distribuir los alimentos que consumimos, fabricar y operar los dispositivos electrónicos que utilizamos, así como para el funcionamiento de los medios de transporte, como automóviles, autobuses, metro y aviones. También es indispensable para la fabricación y distribución de la ropa y los utensilios de uso diario.

La generación de energía eléctrica puede realizarse principalmente a través de dos tipos de fuentes: las convencionales (no renovables) y las renovables. Las fuentes no renovables provienen de combustibles fósiles, como el carbón y el gas natural, que se queman para producir electricidad. El principal problema de estas fuentes es que son recursos finitos, generan contaminación y emiten gases de efecto invernadero. Por otro lado, las fuentes renovables aprovechan recursos naturales que son inagotables o se regeneran continuamente, como la energía del sol, el viento y el agua. Entre los ejemplos más representativos se encuentran la energía hidroeléctrica, solar y eólica.

Actualmente, el uso intensivo de combustibles fósiles para generar electricidad es una de las principales causas del cambio climático. En 2024, cerca del 60 % de la electricidad producida a nivel mundial se obtuvo mediante la quema de combustibles fósiles; el carbón fue la fuente más utilizada, con un 35 %, seguido del gas natural, con un 22 % (IEA, 2024). La combustión de estos combustibles libera grandes cantidades de contaminantes a la atmósfera, entre ellos dióxido de azufre (SO_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O). Los tres últimos se consideran gases de efecto invernadero (GEI), ya que atrapan el calor en la atmósfera y elevan la temperatura media del planeta. Este fenómeno provoca diversos impactos ambientales y sociales, como el derretimiento de glaciares y casquetes polares (con el consecuente aumento del nivel del mar), la alteración de los patrones climáticos que ocasiona sequías, lluvias extremas e incendios forestales, así como la pérdida de biodiversidad y el deterioro de los ecosistemas. Además, estas consecuencias generan impactos económicos y sociales importantes, especialmente en las comunidades más vulnerables (Murphy, 2024).

Con el objetivo de reducir el impacto ambiental y mitigar el cambio climático, en las últimas décadas se ha impulsado una transición energética hacia fuentes renovables de generación eléctrica, como la energía solar fotovoltaica y la energía eólica. Estas tecnologías permiten producir electricidad con emisiones significativamente menores de gases de efecto invernadero, lo que contribuye a la construcción de un sistema energético más limpio, eficiente y sostenible (IRENA, n. d.).

En el contexto de la crisis climática y de la transición energética global, la energía eólica se ha consolidado como una de las tecnologías renovables más relevantes para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y diversificar la matriz eléctrica mundial. Su rápida expansión, competitividad económica y madurez tecnológica la han posicionado como un pilar estratégico en los escenarios internacionales de descarbonización del sector eléctrico (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2022)

1. ENERGÍA EÓLICA

En la actualidad, nuestra forma de vida depende cada vez más de la electricidad, y el rápido crecimiento de la población mundial ha incrementado notablemente la demanda de energía. Entre las fuentes de energía renovable con mayor potencial y desarrollo para la generación de electricidad se encuentra la energía eólica, la cual destaca por su alto grado de madurez tecnológica y por ser una de las alternativas más consolidadas del sector energético.

Pero, ¿qué es la energía eólica? Antes de responder a esta pregunta, conviene recordar que el aprovechamiento del viento no es algo nuevo. La humanidad ha utilizado la energía eólica desde hace más de tres mil años: los antiguos egipcios impulsaban sus embarcaciones con velas que aprovechaban la fuerza del viento. Más tarde, en Persia (actual Irán), se construyeron los primeros molinos de viento de eje vertical (alrededor del siglo VII). Durante la Edad Media (del siglo V al XV), estos molinos se extendieron por Europa y se emplearon para moler granos y bombear agua. Sin embargo, no fue sino hasta el siglo XIX cuando surgieron los primeros aerogeneradores capaces de producir electricidad (figura 1). El primero de ellos fue construido en 1887 por Charles F. Brush, quien diseñó un rotor de 17 metros de diámetro con 144 palas de madera.



Figura 1. Uso de la energía eólica a lo largo de la historia.

Ahora que sabemos que el ser humano ha aprovechado la energía eólica desde hace más de tres mil años, podemos explicar en qué consiste y cuál es su origen. La fuente de la energía eólica es el Sol. La Tierra recibe más radiación solar en el ecuador que en los polos, lo que provoca un calentamiento desigual de su superficie. Además, la tierra y el agua absorben y liberan calor a diferentes tasas. En las zonas donde la radiación solar es más intensa (en el ecuador), el aire se calienta, disminuye su densidad y asciende. En cambio, en las regiones donde llega menos radiación solar, el aire es más frío, su densidad aumenta y desciende. En términos sencillos, el aire caliente asciende y genera una zona de baja presión, mientras que el aire frío desciende y produce una zona de alta presión (figura 2). Esta diferencia de presiones origina el movimiento del aire, es decir, el viento, ya que la atmósfera tiende a equilibrar esas diferencias desplazando el aire desde las zonas de alta presión hacia las de baja presión.

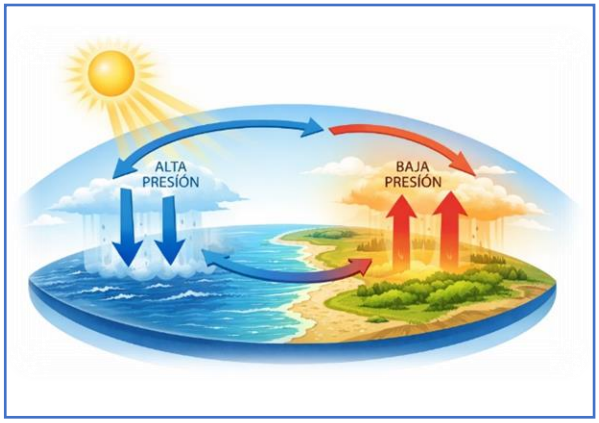


Figura 2. Origen del viento.

El movimiento del aire da origen a la energía eólica, una fuente renovable que aprovecha la energía cinética del viento para transformarla posteriormente en electricidad mediante aerogeneradores o turbinas eólicas. Esta forma de energía se ha convertido en uno de los pilares fundamentales de la transición energética global debido a su bajo impacto ambiental y a su capacidad para reducir la dependencia de los combustibles fósiles, contribuyendo así a mitigar el cambio climático.

Desde el punto de vista económico, la energía eólica representa una de las tecnologías de generación eléctrica más competitivas en la actualidad, ya que

sus costos de instalación y operación han disminuido considerablemente en la última década gracias a los avances tecnológicos, las economías de escala y las mejoras en eficiencia. Además, al no requerir combustible, reduce la exposición a la volatilidad de los precios internacionales del petróleo y del gas natural, lo que brinda mayor estabilidad a los sistemas eléctricos nacionales (Oliver et al., 2026).

Asimismo, la industria eólica impulsa el desarrollo económico regional mediante la generación de empleos directos e indirectos en la fabricación, instalación, operación y mantenimiento de parques eólicos. También atrae inversión extranjera, promueve la innovación tecnológica y fortalece cadenas de suministro locales. En zonas rurales, donde comúnmente se instalan los parques eólicos, se generan ingresos adicionales a través de arrendamientos de tierras y contribuciones fiscales, lo que dinamiza la economía local. En este sentido, la energía eólica no solo contribuye a la sostenibilidad ambiental, sino que también se consolida como un motor estratégico de crecimiento económico, seguridad energética y competitividad industrial en el marco de la transición hacia sistemas energéticos más limpios y resilientes (Xia & Song, 2017).

Los recursos eólicos son abundantes y se distribuyen por casi todo el planeta, lo que les otorga un enorme potencial de desarrollo. Actualmente, las principales centrales eólicas se concentran en regiones como Europa, Norteamérica y Asia, con países europeos como Dinamarca, Alemania y España acumulando amplia experiencia en el aprovechamiento del viento. Sin embargo, China desempeña hoy un papel central en el sector eólico a nivel global y es el país con mayor capacidad instalada del mundo, seguido por Estados Unidos y varios países europeos. Esta posición destaca no solo su capacidad para implementar grandes proyectos eólicos, sino también su influencia en la evolución del mercado y en las cadenas de suministro globales (Zhang et al., 2020).

2. AEROGENERADORES

Una turbina eólica es un dispositivo clave en la generación de electricidad a partir del viento. Su funcionamiento se basa en la conversión de la energía cinética del aire en energía eléctrica; para ello, cuenta con cuatro componentes principales: el rotor, el sistema de transmisión, el generador y

la unidad de control. El rotor está compuesto por palas de diseño aerodinámico que capturan la energía del viento. Cuando las corrientes de aire ejercen fuerza sobre ellas, el rotor comienza a girar, convirtiendo la energía eólica en energía mecánica rotacional. Esta energía se transmite posteriormente al generador a través del sistema de transmisión, donde se convierte en electricidad mediante el principio de inducción electromagnética (fenómeno por el cual un campo magnético cambiante produce una corriente eléctrica). En términos generales, un aerogenerador requiere velocidades de viento mínimas de entre 3 y 5 metros por segundo (m/s) para comenzar a operar, mientras que las velocidades óptimas se sitúan entre 12 y 14 m/s. Cuando el viento supera los 25 m/s, el sistema se detiene automáticamente por razones de seguridad, a fin de evitar daños en sus componentes y reducir el riesgo de accidentes.

2.1 Partes principales de un aerogenerador

En la actualidad, existe una amplia variedad de aerogeneradores (también conocidos como generadores eólicos o turbinas eólicas), que se clasifican principalmente de acuerdo con la orientación de su eje, su ubicación y su tamaño. A pesar de estas diferencias, todos comparten una estructura básica integrada por cuatro elementos fundamentales: el rotor, el sistema de transmisión, el generador y la unidad de control (figura 3). A continuación, se describe de manera breve la función de cada uno de estos componentes:

- Rotor. Su función principal es captar la energía del viento mediante palas o aspas de diseño aerodinámico, similar al de las alas de un avión. Cuando el aire fluye alrededor de estas palas, se produce una diferencia de presión entre sus caras, lo que genera una fuerza de sustentación que hace girar el rotor. Este movimiento inicia el proceso de conversión de la energía cinética del viento en energía eléctrica.

- Eje y sistema de transmisión. Su función es transferir la energía mecánica generada por el rotor al generador eléctrico. El sistema incluye dos ejes principales: el eje de baja velocidad, que conecta el rotor con la caja de cambios o multiplicadora, encargada de aumentar la velocidad de rotación; y el eje de alta velocidad, que conecta la caja de cambios con el generador eléctrico. Además, la caja de engranes incrementa las revoluciones por minuto (rpm) provenientes del rotor hasta alcanzar las rpm necesarias para que el

generador produzca electricidad de manera eficiente. Mientras el rotor de un aerogenerador suele girar a velocidades relativamente bajas (por ejemplo, entre 10 y 30 rpm en turbinas de gran escala), el generador eléctrico requiere velocidades considerablemente mayores, del orden de 1,000 a 1,800 rpm, según el diseño y la frecuencia del sistema eléctrico. Por ello, la caja multiplicadora adapta la velocidad y el par mecánico, permitiendo que el generador opere en condiciones óptimas. En algunos diseños modernos, en particular en los aerogeneradores de accionamiento directo (direct drive), se prescinde de la caja de engranes y se emplean generadores de baja velocidad y mayor diámetro, lo que reduce la cantidad de componentes mecánicos y puede disminuir las necesidades de mantenimiento (Van de Kaa et al., 2020).

- Generador eléctrico. Su función es transformar la energía mecánica, transmitida desde el sistema de transmisión, en energía eléctrica.

- Unidad de control. Su función es supervisar y regular el funcionamiento del aerogenerador, por lo que constituye un componente esencial para garantizar su seguridad y eficiencia. Este sistema cuenta con diversos sensores que miden variables como la temperatura, las vibraciones y la potencia. La información recopilada se envía a una unidad de monitoreo que procesa los datos y toma decisiones en tiempo real. La unidad de control permite optimizar la generación de energía eléctrica y, en caso de condiciones adversas, como vientos excesivos o fallas en algún componente, puede frenar o detener el aerogenerador para evitar daños y mantener su operación segura. Los sistemas de control en aerogeneradores pueden clasificarse en pasivos o activos, dependiendo de su diseño y nivel de complejidad. Los sistemas de control pasivos se utilizan en aerogeneradores de baja potencia (generalmente hasta 5 kW). Funcionan sin mecanismos electrónicos complejos y se basan en principios aerodinámicos o mecánicos para regular la potencia. Por ejemplo, pueden utilizar la pérdida aerodinámica (stall control) o colas direccionales que orientan automáticamente el rotor hacia el viento. Estos sistemas son más simples, económicos y requieren menor mantenimiento. Por su parte, los sistemas de control activos se emplean en aerogeneradores de gran capacidad (del orden de los MW). Incorporan sistemas electrónicos avanzados, actuadores hidráulicos

o eléctricos y algoritmos de control que permiten ajustar dinámicamente el ángulo de las palas (pitch control) y la orientación de la góndola (yaw control). Gracias a estos ajustes, se maximiza la captación de energía en condiciones normales y se protege la turbina ante vientos excesivos, ya que el sistema puede frenar o detener el rotor cuando es necesario (Apata & Oyedokun, 2020).

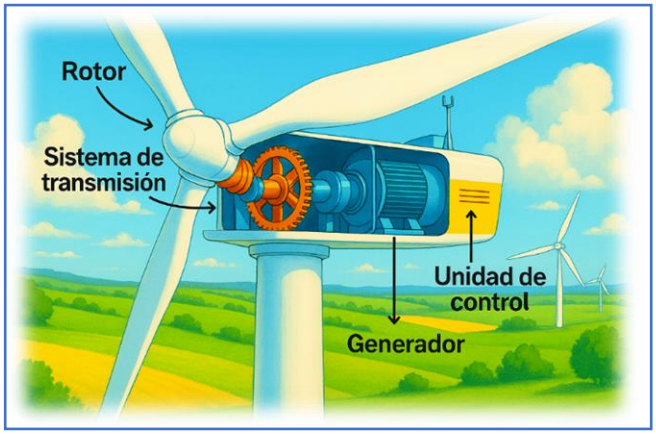


Figura 3. Partes de un aerogenerador.

2.2 TIPOS DE AEROGENERADORES

A. Según la orientación del eje. Se clasifican en aerogeneradores de eje horizontal y aerogeneradores de eje vertical (figura 4):

- Aerogeneradores de eje horizontal. Este tipo de aerogeneradores es el más común y presenta el mayor grado de desarrollo y madurez tecnológica en comparación con los de eje vertical. Por razones de estabilidad, eficiencia y facilidad de mantenimiento, la mayoría cuenta con tres palas unidas a un eje orientado paralelamente al suelo. Para alcanzar un alto rendimiento, requieren vientos fuertes y constantes. Debido a su tamaño y diseño, necesitan torres de gran altura, ya que la velocidad del viento aumenta conforme se incrementa la altitud, como consecuencia del comportamiento de la capa límite atmosférica: cerca del suelo, la fricción con la superficie terrestre (rugosidad del terreno, edificaciones, vegetación) reduce la velocidad del viento y genera mayor turbulencia. A mayor altura, la influencia de esta fricción disminuye, el flujo de aire se vuelve más uniforme y la velocidad media del viento aumenta, lo que incrementa significativamente la energía disponible, pues la

potencia eólica es proporcional al cubo de la velocidad del viento. Además, pueden instalarse tanto en tierra (onshore) como en el mar (offshore) (Mata et al., 2024).

- Aerogeneradores de eje vertical. Estos aerogeneradores son menos comunes que los de eje horizontal y se clasifican en tres tipos principales: Savonius, Darrieus e híbridos (Darrieus-Savonius). El tipo Savonius es el diseño más simple. Se considera un aerogenerador "lento" porque opera a bajas velocidades de rotación, generalmente entre 50 y 200 rpm. Presenta menor eficiencia y puede generar mayor ruido; sin embargo, tiene la ventaja de funcionar con vientos de baja intensidad. Por ello, suele emplearse en aplicaciones de pequeña potencia o en entornos donde la simplicidad y la fiabilidad son prioritarias.

- Los aerogeneradores tipo Darrieus, en cambio, presentan mayor eficiencia aerodinámica, pero requieren asistencia para iniciar su funcionamiento, ya que no pueden arrancar por sí solos. Se consideran aerogeneradores "rápidos", pues operan entre 150 y 600 rpm, pueden adaptarse a cambios en la dirección del viento y se instalan en zonas con vientos de baja o media intensidad. No obstante, generan mayor ruido y vibraciones que los Savonius y su mantenimiento puede resultar más complejo (Lee et al., 2024).

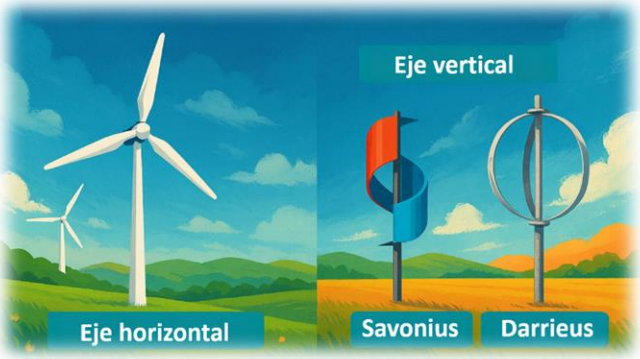


Figura 4. Tipos de aerogeneradores según la orientación de su eje: aerogeneradores de eje horizontal y de eje vertical.

B. Según su potencia. La clasificación de los aerogeneradores según su potencia nominal se puede establecer de la siguiente manera:

- Microeólicos. Son equipos con una potencia inferior a 20 kW,

utilizados principalmente para el suministro de electricidad en viviendas o en zonas rurales aisladas. Se emplean en hogares, pequeñas instalaciones agrícolas y sistemas híbridos (Kaldellis & Zafirakis, 2011).

- Minieólicos. Incluyen aerogeneradores con potencias entre 20 y 200 kW, destinados principalmente a la generación de energía para autoconsumo o para la venta de electricidad a la red. Se utilizan en pequeñas comunidades y en instalaciones comerciales o industriales (Husien et al., 2013).
- Eólicos de gran escala. Comprenden aerogeneradores con potencias superiores a 200 kW que forman parte de parques eólicos conectados a la red eléctrica (Dixon et al., 2025).

C. Según su ubicación. Se clasifican en terrestres y marinos:

- Terrestres (onshore). Las turbinas son instaladas en tierra firme como llanuras, colinas o zonas montañosas. Se usan generalmente aerogeneradores de eje horizontal con potencias individuales de 2 a 6 MW con tamaños de rotor y altura de la torre de más de 100 metros. Tienen un impacto visual y acústico considerable, por lo que se recomienda instalarlos en zonas alejadas de la población.
- Marinos (*offshore*). Se instalan en el mar, donde el viento es más constante y de mayor intensidad. Los aerogeneradores que se colocan en estos entornos generalmente son de eje horizontal, con potencias superiores a 8 MW. El diámetro de sus rotores puede superar los 200 metros (Burton et al., 2011).

3. Panorama global de la energía eólica

Según la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, por sus siglas en inglés), los países que lideran la capacidad eléctrica instalada en energía eólica son China, Estados Unidos, Alemania, India y España (figura 5) (IRENA, 2025).



Figura 5. Energía eólica en el mundo: capacidad instalada en 2023.

En el año 2023, China registró una capacidad de 441.8 GW, seguida por Estados Unidos con 147.5 GW, Alemania con 69.4 GW, India con 44.7 GW y España con 30.8 GW. Por otro lado, Graham et al. (2025), en el Global Electricity Review 2025 de Ember, reportaron que, del total de la electricidad generada a nivel mundial en 2024, el 40 % provino de fuentes bajas en carbono, impulsado principalmente por el crecimiento de la energía solar y eólica. En este contexto, la energía eólica ocupó el tercer lugar en contribución, con una participación del 8.1 % (Graham et al., 2025).

En el caso de México, la Asociación Mexicana de Energía Eólica (AMDEE) reportó que, para 2023, la capacidad instalada de energía eólica alcanzó 7.7 GW. Del total de electricidad generada en el país, aproximadamente 5.98 % provino de esta fuente. Esta industria genera cerca de 9,500 empleos directos y evita la emisión de alrededor de 9 millones de toneladas de CO_2 al año, lo que equivale a retirar de circulación aproximadamente 2.2 millones de automóviles (AMDEE, 2025).

De acuerdo con el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN 2024–2038), se prevé ampliar la capacidad instalada de energía eólica durante los próximos quince años, así como fortalecer el papel de las energías renovables en la matriz eléctrica nacional, lo que contribuirá a la transición energética planificada en el país (Secretaría de Energía [SENER, 2024]).

CONCLUSIONES

Con el fin de mitigar el cambio climático, es necesario implementar diversas acciones orientadas a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero,

los principales responsables del calentamiento global. Una de las estrategias más efectivas para lograrlo es impulsar el uso de energías renovables, especialmente la solar fotovoltaica y la eólica. Ambas permiten generar electricidad de manera sostenible, que se emplea tanto en las actividades cotidianas como en la producción y operación de dispositivos y medios de transporte.

La energía eólica, en particular, aprovecha la energía cinética del viento para producir electricidad con una baja huella de carbono. A nivel mundial, ocupa el tercer lugar entre las tecnologías de generación eléctrica con menores emisiones, con una participación del 8.1 %. En el caso de México, esta cifra es de 5.9 %.

No obstante, el desarrollo de la energía eólica enfrenta diversos retos que deben superarse para asegurar su crecimiento sostenido. Entre ellos se encuentran mejorar la eficiencia de las turbinas, minimizar el impacto en la biodiversidad y en el uso del suelo, reducir los efectos visuales y acústicos, y optimizar la gestión de los residuos generados al término de la vida útil de los aerogeneradores.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT) por el apoyo económico otorgado para la realización de este proyecto de investigación a través del Programa "Investigadoras e Investigadores COMECYT 2025", folio EESP2025-0006.

REFERENCIAS

Apata, O., & Oyedokun, D. T. O. (2020). An overview of control techniques for wind turbine systems. *Scientific African, 10*, e00566. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00566

Asociación Mexicana de Energía Eólica. (2025). *Informe anual AMDEE 2025*. https://amdee.org/es_es/project/informe-anual-amdee-2025/

Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., & Bossanyi, E. (2011). *Wind energy handbook* (2nd ed.). John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/9781119992714

Dixon, S. L., Hall, C. A., & Zhao, D. (2025). *Fluid mechanics and thermodynamics of turbomachinery* (8th ed.). Butterworth-Heinemann. https://doi.org/10.1016/C2023-0-50955-3

Graham, E., Fulghum, N., & Altieri, K. (2025). *Global electricity review 2025*. Ember. https://ember-energy.org/es/analisis/global-electricity-review-2025/

Husien, W., El-Osta, W., & Dekam, E. (2013). Effect of the wake behind wind rotor on optimum energy output of wind farms. *Renewable Energy, 49*, 128–132. https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.048

International Energy Agency. (2025, October 22). *Global electricity generation by source, 2024* [Chart]. https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-electricity-generation-by-source-2024

International Renewable Energy Agency. (s. f.). *Country rankings*. Retrieved September 28, 2026, from https://www.irena.org/Data/View-data-by-topic/Capacity-and-Generation/Country-Rankings

International Renewable Energy Agency. (2025). *Renewable power generation costs in 2024*. https://www.irena.org/Publications/2025/Jun/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2024

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate change 2022: Mitigation of climate change: Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157926

Kaldellis, J. K., & Zafirakis, D. (2011). The wind energy (r)evolution: A short review of a long history. *Renewable Energy, 36*(7), 1887–1901. https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.01.002

Lee, K.-Y., Cruden, A., Ng, J.-H., & Wong, K.-H. (2024). Variable designs of vertical axis wind turbines—a review. *Frontiers in Energy Research, 12*, 1437800. https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1437800

Mata, S. A., Pena Martínez, J. J., Bas Quesada, J., Palou Larrañaga, F., Yadav, N., Chawla, J. S., Sivaram, V., & Howland, M. F. (2024). Modeling the effect of wind speed and direction shear on utility-scale wind turbine power production. *Wind Energy, 27*(9), 873–899. https://doi.org/10.1002/we.2917

Murphy, R. (2024). What is undermining climate change mitigation? How fossil-fuelled practices challenge low-carbon transitions. *Energy Research & Social Science, 108*, 103390. https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103390

Oliver, M. E., Chapman, O., Grijalva, S., Matisoff, D. C., Ramadhani, M., & West, A. (2026). Managing zero-marginal-cost, intermittent renewable energy: A survey of the

engineering, economic, and policy challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 226*, 116334. https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116334

Secretaría de Energía. (2024, May 31). *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2024–2038*. Gobierno de México. https://www.gob.mx/sener/articulos/programa-de-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional-2024-2038

Van de Kaa, G., van Ek, M., Kamp, L. M., & Rezaei, J. (2020). Wind turbine technology battles: Gearbox versus direct drive—Opening up the black box of technology characteristics. *Technological Forecasting and Social Change, 153*, 119933. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.119933

Xia, F., & Song, F. (2017). Evaluating the economic impact of wind power development on local economies in China. *Energy Policy, 110*, 263–270. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.08.030

Zhang, S., Wei, J., Chen, X., & Zhao, Y. (2020). China in global wind power development: Role, status and impact. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 127*, 109881. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109881

NANOPARTÍCULAS DE SELENIO EN LA BIOMEDICINA: SÍNTESIS, PROPIEDADES Y APLICACIONES TERAPÉUTICAS.

SELENIUM NANOPARTICLES IN BIOMEDICINE: SYNTHESIS, PROPERTIES AND THERAPEUTIC APPLICATIONS

MORENO RODRÍGUEZ, Estefany Arisbeth[1]

MÚZQUIZ RAMOS, Elia Martha[1]

LÓPEZ DE LA PEÑA, Haydeé Yajaira[2]

LÓPEZ BADILLO, Claudia Magdalena[1]

RESUMEN

Las nanopartículas de selenio (SeNP) han emergido como una alternativa prometedora en la biomedicina moderna gracias a su baja toxicidad, alta biocompatibilidad y multifuncionalidad terapéutica. Este artículo presenta una revisión general sobre su origen, métodos de síntesis y principales aplicaciones biomédicas. El selenio, elemento esencial para el organismo, adquiere propiedades mejoradas al reducirse a escala nanométrica, incrementando su biodisponibilidad y capacidad antioxidante. Las SeNP pueden obtenerse mediante diversas técnicas biológicas, químicas y físicas, siendo la biosíntesis la opción más sostenible y biocompatible. Además, su superficie funcionalizable permite su uso como vehículos inteligentes para la liberación dirigida de fármacos, con aplicaciones emergentes en medicina regenerativa y neuroprotección. En el ámbito médico, las SeNP destacan por su actividad anticancerígena, antioxidante, antimicrobiana, antidiabética y antiinflamatoria, actuando mediante la modulación de vías moleculares relacionadas con el estrés oxidativo y la apoptosis. En conjunto, las nanopartículas de selenio representan una plataforma versátil y sustentable con un gran potencial en el desarrollo de terapias más seguras, específicas y eficaces, consolidándose como una herramienta clave para la nanomedicina del futuro.

Palabras clave: selenio; nanopartículas; síntesis; aplicaciones biomédicas.

1. Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila. Saltillo, Coahuila, México.

2. Departamento de Ciencia y Tecnología de Alimentos, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México.

ABSTRACT

Selenium nanoparticles (SeNP) have emerged as a promising alternative in modern biomedicine due to their low toxicity, high biocompatibility, and therapeutic multifunctionality. This article provides a general overview of their

Correspondencia
cllopezb@uadec.edu.mx
https://orcid.org/0000-0001-6892-1541

Fecha de recepción
26 de noviembre de 2025.
Fecha de aceptación
21 de agosto de 2026.

Este artículo fue sometido a revisión por pares doble ciego

origin, synthesis methods, and main biomedical applications. Selenium, an essential element for the human body, acquires enhanced properties when reduced to the nanoscale, increasing its bioavailability and antioxidant capacity. SeNP *can be obtained through various biological, chemical, and physical techniques, with biosynthesis being the most sustainable and biocompatible option. Moreover, their functionalizable surface allows their use as smart carriers for targeted drug delivery, with emerging applications in regenerative medicine and neuroprotection. In the medical field,* SeNP *stand out for their anticancer, antioxidant, antimicrobial, antidiabetic, and anti-inflammatory activities, acting through the modulation of molecular pathways related to oxidative stress and apoptosis. Overall, selenium nanoparticles represent a versatile and sustainable platform with great potential in the development of safer, more specific and effective therapies, establishing themselves as a key tool for the nanomedicine of the future.*

Keywords: *selenium; nanoparticles; biomedical applications; synthesis.*

1. INTRODUCCIÓN

El selenio (Se) tiene una gran importancia en campos como la química, biología y física. En la naturaleza, el selenio puede encontrarse en forma de seleniuro y en menor cantidad como un elemento libre asociado con azufre elemental e hidrógeno (Hernández-Mendoza y Rios-Lugo, 2009). Se considera un elemento escaso pues la concentración de Se en la corteza terrestre es de 0.09 ppm y es posible encontrarlo en todos los suelos, tanto forestales como agrícolas (Acosta, 2007).

El selenio es un oligoelemento esencial para el organismo humano; una dieta libre conlleva un mal funcionamiento del hígado y procesos hemolíticos. La deficiencia de Se puede derivar en múltiples enfermedades, como la enfermedad de Kashin-Beck, trastornos neurológicos y enfermedades crónicas degenerativas (Huang et al., 2005; Pillai et al., 2014; Rayman, 2000).

Las investigaciones en nanotecnología permitieron encontrar una infinidad de aplicaciones para nanopartículas metálicas en biomedicina. Se han demostrado múltiples beneficios de las nanopartículas de plata (Ag) y oro (Au), sin embargo, su síntesis es más costosa en comparación con las nanopartículas de selenio (SeNP) (Zafar et al., 2003).

Las SeNP muestran un potencial prometedor como antioxidantes, agentes terapéuticos contra el cáncer y portadores de fármacos en aplicaciones biológicas (Forootanfar et al., 2014; Yu et al., 2012; Shakibaie et al., 2015). Entre todas las formas en que puede encontrarse el Se, la menos tóxica es el Se en su forma elemental, por lo que como nanopartículas han atraído aún más atención, además de que también se ha demostrado que las SeNP funcionalizadas exhiben menos citotoxicidad que otras de sus formas como el selenato, selenito, selenoproteínas y selenio inorgánico (Panahi-Kalamuei et al., 2014; Zhang et al., 2001; Zhang et al., 2008).

Múltiples reseñas acerca de las aplicaciones biológicas de las SeNP se centran en los métodos de síntesis (Ikram et al., 2021), por lo que el objetivo de este artículo es dar a conocer el panorama general de las nanopartículas de selenio, así como sus métodos de síntesis incluyendo sus ventajas y desventajas, dando un mayor énfasis en las aplicaciones de las SeNP en la biomedicina.

2. SELENIO

El selenio (Se) es uno de los elementos más ampliamente distribuidos sobre la corteza terrestre y rara vez está presente en materiales en concentraciones arriba de 500 µg/g. Gran parte del Se presente en la corteza se encuentra generalmente asociado con minerales sulfurosos o en forma de seleniuros de plata, cobre, plomo, mercurio y níquel otros metales (Acosta, 2007; Shamberger, 1981). La actividad volcánica también da origen al Se, acompaña al azufre y es posible encontrarlo en terrenos arcillosos (Acosta, 2007).

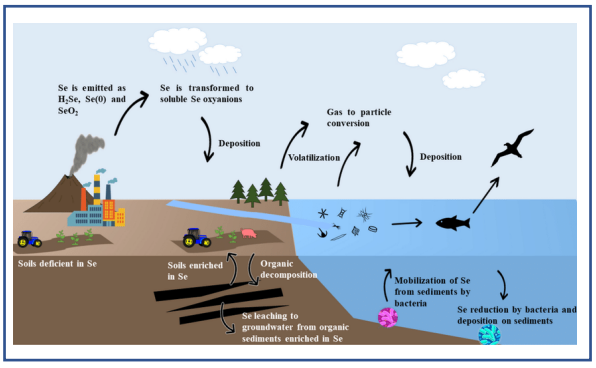


Figura 1. Ciclo biogeoquímico simplificado del Selenio.
(Petrović, M., 2021).

Ocupa el sexagésimo lugar en el orden de abundancia de los elementos, pues a pesar de que se encuentra distribuido a lo largo de toda la corteza terrestre, es un elemento bastante

escaso. Puede encontrarse en cantidades pequeñas pero detectables en todos los suelos o producirse como subproducto de la fabricación industrial de azufre y del ácido sulfúrico.

3. NANOPARTÍCULAS

La característica que define a todos los nanomateriales es el tamaño. A pesar de que es un concepto fácil de entender, es difícil de aplicar, pues no existen límites naturales, físicos o químicos que delimiten la nanoescala (Pandey & Dahiya, 2016). El rango de tamaño más utilizado en referencia a los nanomateriales va de 1 a 100 nm, pero no existe una línea clara que separe la nanoescala desde una perspectiva química o biológica (Boverhof et al., 2015).

3.1 NANOPARTÍCULAS DE SELENIO (SeNP)

El reciente auge en la nanotecnología proporcionó múltiples aplicaciones para las nanopartículas metálicas en la biomedicina pues ofrece ventajas únicas (Zafar et al., 2003). Nanopartículas metálicas como las de oro y plata tienen una gran cantidad de beneficios médicos, pero resultan más costosas de sintetizar en comparación con las nanopartículas de selenio (SeNP), además de que estas últimas pueden integrarse con otros agentes biológicos para mejorar sus propiedades biológicas.

Las formas nano del Se han atraído mucha atención gracias a su alta biodisponibilidad y a su baja toxicidad en comparación con sus formas orgánicas e inorgánicas, siendo que estas últimas muestran una mayor toxicidad entre ambas (Shi et al., 2011; Zhang et al. 2008).

Las propiedades biológicas de las SeNP dependen de su tamaño, partículas pequeñas presentan una mejor actividad (Fajit et al., 2009). El Se en tamaño nano tiene un muy amplio rango de aplicaciones biomédicas.

Las SeNP muestran un gran potencial como antioxidantes, agentes terapéuticos contra el cáncer y portadores de fármacos en aplicaciones biológicas (Forootanfar et al., 2014). Los resultados en múltiples estudios indican que las SeNP pueden ser más útiles como posible fármaco anticancerígeno, así como portador de fármacos anticancerígenos (Chen et al., 2008; Luo et al., 2012). Otras investigaciones demuestran su efecto

antimicrobiano y actividad antifúngica (Cremonini et al., 2016). Además de que existen documentaciones donde se plasman sus efectos protectores contra la intoxicación por metales (Hassanin et al. 2013; Trabelsi et al., 2013), y, por último, pero no menos importante, las SeNP tienen efectos benéficos en una gran variedad de funciones fisiológicas.

En estudios clínicos, se han usado SeNP en lugar de las fuentes convencionales de Se y se ha demostrado que puede ser una mejor alternativa (Zhang et al., 2001). En la actualidad, las investigaciones en relación con las SeNP se han visto en aumento debido a sus amplias aplicaciones dentro de la biomedicina debido a su buena actividad antibacteriana, que resulta incluso más efectiva que las nanopartículas de plata (Huang et al. 2003).

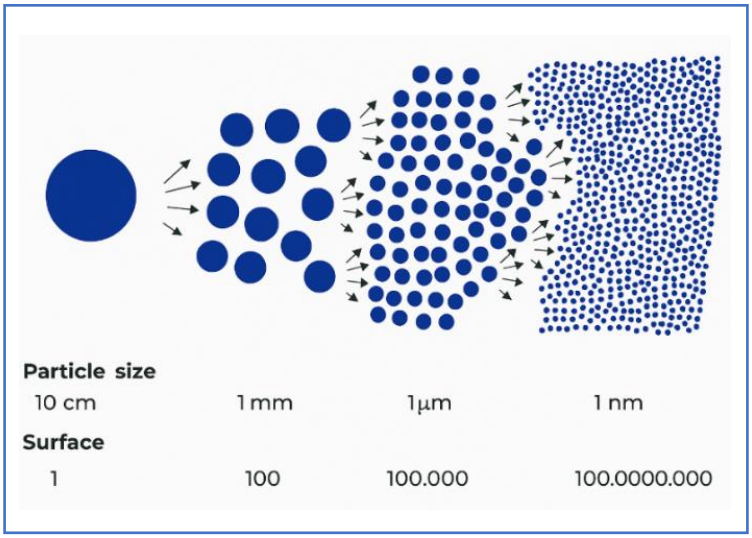


Figura 2. Representación esquemática del tamaño y la superficie de las partículas a escala nanométrica. (Subramanian, K., D'Souza, L., y Alhaarathi, A., 2008).

4. Síntesis de SeNP

El método de síntesis de las SeNP es un factor determinante para definir su tamaño, forma, estabilidad y, por lo tanto, su comportamiento biológico y terapéutico. Según Khurana et al. (2019) y Bisht et al. (2022), los principales métodos de obtención se clasifican en tres grandes categorías: biosíntesis, reducción química y métodos físicos.

4.1 Biosíntesis

La biosíntesis, también conocida como síntesis verde, utiliza organismos vivos o extractos biológicos como agentes reductores y estabilizantes naturales. Esta

aproximación se basa en la capacidad de ciertos microorganismos, plantas y biomoléculas para transformar compuestos de selenio inorgánico (como selenito o selenato de sodio) en su forma elemental (Se^0).

- Microorganismos. Bacterias como *Bacillus*, *Pseudomonas* y *Enterobacter* son capaces de reducir selenitos a nanopartículas de selenio mediante enzimas reductasas y metabolitos secundarios. Este proceso es ambientalmente benigno y genera SeNP biocompatibles, recubiertas naturalmente con proteínas o polisacáridos microbianos que mejoran su estabilidad coloidal.
- Hongos y levaduras. Especies como *Saccharomyces cerevisiae* y *Aspergillus terreus* también han sido utilizadas para producir SeNP con una morfología esférica y un diámetro controlado entre 50 y 150 nm, lo que las hace ideales para aplicaciones farmacológicas.

- Extractos vegetales. En la fitosíntesis, extractos de hojas, frutos o raíces actúan como reductores y agentes de encapsulamiento. Los compuestos fenólicos, flavonoides y terpenoides presentes en las plantas facilitan la reducción de Se^{4+} a Se^0, evitando el uso de reactivos tóxicos. Ejemplos incluyen extractos de *Aloe vera*, *Camellia sinensis* (té verde) y *Allium sativum* (ajo).

Hosnedlová et al. (2018) destacan que la biosíntesis es económica, sustentable y biocompatible, además de permitir una funcionalización natural de las nanopartículas con biomoléculas que pueden potenciar su acción terapéutica (anticancerígena, antioxidante, antimicrobiana, etc.).

4.2 Reducción química

La reducción química es el método más comúnmente empleado en laboratorio para la obtención de SeNP. Se basa en la reducción de sales de selenio por ejemplo Na_2SeO_3 u óxidos como SeO_2, utilizando agentes reductores químicos que convierten los iones Se^{4+} en selenio elemental (Se^0).

Entre los agentes reductores más utilizados se encuentran:

- Ácido ascórbico (vitamina C)
- Glutatión
- Hidrazina
- Sodio borohidruro ($NaBH_4$)

- Azúcares reductores como la glucosa o la sacarosa

El proceso suele realizarse en medios acuosos, controlando cuidadosamente la temperatura, el pH y el tiempo de reacción para ajustar el tamaño y la forma de las partículas. Los estabilizantes (como el almidón, el quitosano o la PVP –polivinilpirrolidona–) se añaden para evitar la aglomeración.

Khurana et al. (2019) subrayan que este método permite obtener SeNP monodispersas con diámetros de 20 a 200 nm, pero la presencia de residuos químicos puede limitar su uso en aplicaciones biomédicas si no se realiza una purificación adecuada.

A pesar de ello, la reducción química sigue siendo el método de referencia por su simplicidad, reproducibilidad y capacidad de escalarse a nivel industrial.

4.3 MÉTODOS FÍSICOS

Los métodos físicos emplean energía externa para inducir la formación de nanopartículas de selenio a partir de materiales macroscópicos. Entre las técnicas más comunes se encuentran:

- Evaporación térmica y deposición de vapor: se vaporiza el selenio metálico y se condensa posteriormente en forma de nanopartículas bajo atmósferas controladas.

- Irradiación con láser o radiación gamma: estas técnicas promueven la nucleación y crecimiento de partículas sin necesidad de reactivos químicos, produciendo SeNP altamente puras y estables.

- Método de microemulsión y ultrasonido: la sonicación o el confinamiento en microgotas permite controlar el tamaño y evitar la agregación, dando lugar a partículas esféricas uniformes.

De acuerdo con Bisht et al. (2022), los métodos físicos ofrecen gran control estructural y producen nanopartículas con excelente pureza, aunque su principal desventaja es el alto costo energético y la necesidad de equipamiento especializado.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los métodos de síntesis de SeNP.

Método	Ventajas	Desventajas
Biosíntesis	Económica, sustentable y biocompatible. Evita reactivos tóxicos. Permite una funcionalización natural con biomoléculas.	Control limitado sobre el tamaño y forma de las nanopartículas. Requiere tiempos de reacción prolongados.
Reducción química	Método sencillo, reproducible y escalable. Permite control sobre tamaño y morfología.	Posible presencia de residuos químicos que limitan su aplicación biomédica si no se purifica adecuadamente.
Métodos físicos	Alta pureza del producto. Gran control estructural y morfológico. No requiere reactivos químicos.	Alto costo energético y necesidad de equipamiento especializado. Difícil de escalar.

Nota: Tomado de Bisht et al. (2022); Hosnedlová et al. (2018); Khurana et al. (2019).

5. APLICACIONES BIOMÉDICAS

5.1 ACTIVIDAD ANTICANCERÍGENA

El efecto anticancerígenode las SeNP es uno de los más estudiados y destacados. Su acción se basa principalmente en la inducción selectiva de estrés oxidativo dentro de las células tumorales, lo que desencadena una cascada de eventos que culmina en apoptosis (muerte celular programada).

A diferencia de compuestos tradicionales de Se, las SeNP son menos tóxicas para las células sanas y muestran mayor afinidad por los tejidos tumorales. Esto se debe a que las células cancerígenas presentan un metabolismo más activo y una mayor absorción de nanopartículas.

De acuerdo con Khurana et al. (2019), las SeNP pueden promover la activación de caspasas y alterar la actividad mitocondrial, conduciendo a la muerte de las células malignas. Se ha observado eficacia en modelos de cáncer de hígado, mama, pulmón, próstata y glioblastoma.

Además, la funcionalización de SeNP con biopolímeros naturales, como quitosano o polisacáridos derivados de Spirulina y Undaria pinnatifida,

aumenta su estabilidad y potencia antitumoral. Estas formulaciones no solo inducen apoptosis, sino que también interfieren en la expresión de genes relacionados con la proliferación celular y con la inhibición de la angiogénesis tumoral.

En síntesis, las SeNP actúan como quimiopreventivos y coadyuvantes en terapias oncológicas, con el beneficio adicional de reducir los efectos secundarios asociados a los tratamientos convencionales (Bisht et al., 2022; Sakr, Korany y Katti, 2018).

5.2 ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE

El estrés oxidativo es un proceso natural del metabolismo, pero su exceso causa daño celular y está implicado en el envejecimiento y enfermedades degenerativas. Las SeNP destacan por su extraordinaria capacidad antioxidante, actuando tanto de forma directa como indirecta.

En su acción directa, las SeNP neutralizan radicales libres gracias a la liberación controlada de átomos de Se en estado cero. Indirectamente, estimulan la expresión de enzimas antioxidantes dependientes de Se, como el glutatión peroxidasa (GPx) y la tioredoxina reductasa (TrxR), que protegen las membranas celulares del daño oxidativo.

Hosnedlová et al. (2018) señalan que las SeNP de menor tamaño (5-15 nm) presentan una actividad antioxidante superior debido a su mayor relación superficie/volumen, lo que favorece las reacciones redox del ADN y los lípidos incluso en concentraciones menores a las necesarias para los compuestos inorgánicos de Se.

5.3 ACTIVIDAD ANTIDIABÉTICA

En el ámbito metabólico, las SeNP muestran una marcada actividad antidiabética y de acuerdo con Bisht et al. (2022) y Khurana et al. (2019), estas nanopartículas ayudan a regular los niveles de glucosa y a proteger las células β pancreáticas del daño oxidativo causado por la hiperglucemia.

El mecanismo involucra la reducción de radicales libres en el páncreas, la mejora de la sensibilidad a la insulina y la inhibición de enzimas prooxidantes que dañan los islotes de Langerhans. Asimismo, las SeNP restauran los niveles antioxidantes endógenos como el glutatión y regulan la expresión de genes relacionados con la homeostasis de la glucosa.

Otra ventaja clave es su liberación controlada y sostenida, lo que evita picos de concentración que podrían generar toxicidad. Su biocompatibilidad y estabilidad las convierten en candidatas prometedoras para el desarrollo de suplementos o fármacos antidiabéticos más seguros.

5.4 ACTIVIDAD ANTIINFLAMATORIA

La inflamación crónica es un componente común de muchas patologías, desde la artritis hasta enfermedades cardiovasculares. Las SeNP muestran efectos antiinflamatorios potentes al modular rutas moleculares implicadas en la respuesta inmunitaria.

Actúan reduciendo la activación del factor de transcripción NF-kB, responsable de la producción de citocinas proinflamatorias. También regulan a señalización del inflamasoma NLRP3, reduciendo la liberación de mediadores inflamatorios.

En modelos animales, las SeNP disminuyeron la hinchazón y el daño tisular en tejidos inflamados, además de restaurar la actividad antioxidante endógena. Su doble acción antioxidante y antiinflamatoria las convierte en compuestos de gran interés para tratar enfermedades autoinmunes y neuroinflamatorias.

5.5 ACTIVIDAD ANTIMICROBIANA

Las SeNP también se destacan por su actividad antimicrobiana de amplio espectro, capaz de inhibir bacterias Gram positivas (*Staphylococcus aureus*) y Gram negativas (*Escherichia coli, Pseudomonas aeruginosa*).

El mecanismo propuesto incluye la interacción electrostática con las membranas bacterianas, provocando su desorganización, la inhibición de enzimas esenciales y la inducción de estrés oxidativo que lleva a la muerte celular bacteriana.

Bisht et al. (2022) demostraron que las SeNP pueden ser incluso más efectivas que las nanopartículas de plata, tradicionalmente usadas por su efecto antibacteriano. Además, al ser biocompatibles y menos tóxicas, son ideales para aplicaciones médicas como recubrimientos antimicrobianos, apósitos cicatrizantes y sistemas de liberación controlada de fármacos.

5.6 ACTIVIDAD ANTIFÚNGICA

Finalmente, las SeNP han mostrado actividad antifúngica relevante frente a cepas patógenas como *Candida albicans* y *Aspergillus niger*. Su acción consiste en alterar la integridad de la membrana fúngica, interferir en la síntesis de ergosterol, e inducir estrés oxidativo que afecta las estructuras celulares internas del hongo.

Debido a su bajo impacto ambiental y biocompatibilidad, las SeNP podrían remplazar los antifúngicos sintéticos convencionales en aplicaciones médicas, farmacéuticas y agroindustrales.

6. AVANCES Y NUEVAS PERSPECTIVAS

En la última década, las nanopartículas de selenio (SeNP) se han posicionado como una de las herramientas más versátiles y prometedoras en la nanomedicina moderna. Su evolución ha pasado de simples sistemas antioxidantes a plataformas multifuncionales capaces de diagnosticar, tratar y prevenir enfermedades complejas. Los avances recientes en su diseño, funcionalización y aplicación terapéutica marcan un cambio de paradigma en la forma en que se conciben los tratamientos médicos del futuro.

6.1 SeNP COMO VEHÍCULOS INTELIGENTES DE FÁRMACOS

Uno de los avances más notables es el desarrollo de sistemas de liberación controlada de fármacos basados en SeNP. Gracias a su superficie altamente modificable, las nanopartículas pueden conjugarse con moléculas terapéuticas, anticuerpos, péptidos o polímeros biocompatibles, permitiendo una administración selectiva hacia células o tejidos específicos.

Khurana et al. (2019) destacan que esta capacidad de direccionamiento selectivo reduce los efectos secundarios y aumenta la eficacia del tratamiento, especialmente en terapias contra el cáncer. Por ejemplo, las SeNP funcionalizadas con quitosano, ácido fólico o doxorrubicina pueden reconocer receptores sobreexpresados en células tumorales, liberando el fármaco directamente en el microambiente maligno.

Este enfoque abre la puerta a terapias personalizadas y de precisión, donde la nanopartícula actúa como un "caballo de Troya" que introduce el agente terapéutico dentro de la célula enferma con mínima afectación a las células sanas.

6.2 APLICACIONES EN MEDICINA REGENERATIVA Y NEUROPROTECCIÓN

Otra área en crecimiento es el uso de SeNP en la regeneración tisular y la neuroprotección. Gracias a su capacidad antioxidante, estas nanopartículas pueden prevenir la muerte neuronal inducida por estrés oxidativo, una de las principales causas del deterioro cognitivo y enfermedades neurodegenerativas como el Alzheimer o el Parkinson.

Asimismo, se ha demostrado que las SeNP estimulan la proliferación de células madre mesenquimales y promueven la reparación de tejidos lesionados, sugiriendo su potencial en la ingeniería de tejidos y la medicina regenerativa.

Los avances en el diseño, la síntesis y la aplicación de las nanopartículas de selenio reflejan un progreso sustancial hacia una nanomedicina más segura, eficaz y sostenible. Los métodos de biosíntesis y funcionalización han permitido obtener sistemas biocompatibles con amplias propiedades terapéuticas, mientras que las estrategias híbridas y los enfoques teranósticos amplían sus horizontes hacia la medicina personalizada.

En conjunto, las SeNP representan una nueva generación de agentes terapéuticos inteligentes, capaces de actuar como antioxidantes, anticancerígenos, antidiabéticos y antimicrobianos, pero también como vehículos de liberación dirigida, inmunomoduladores y herramientas diagnósticas.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una visión general sobre las nanopartículas de selenio y sus aplicaciones en la biomedicina, un campo que ha mostrado un crecimiento constante gracias al potencial de estos nanomateriales. Las SeNP destacan por combinar la bioactividad del selenio con las ventajas

estructurales y funcionales de la escala nanométrica, lo que las convierte en una plataforma versátil para el desarrollo de nuevas terapias. El método de síntesis —biológico, químico o físico— influye directamente en sus propiedades, como el tamaño, la estabilidad y la actividad biológica, siendo los métodos biológicos especialmente valorados por su sostenibilidad y biocompatibilidad. Gracias a esta diversidad, las SeNP han demostrado eficacia en aplicaciones anticancerígenas, antioxidantes, antimicrobianas, antidiabéticas y antiinflamatorias. En conjunto, su bajo perfil tóxico, multifuncionalidad y capacidad de ser modificadas o combinadas con otros materiales las consolidan como una alternativa innovadora y sostenible para el diseño de terapias más seguras, específicas y eficaces en la medicina moderna.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a la Universidad Autónoma de Coahuila, a la Facultad de Ciencias Químicas, al posgrado de Maestría en Ciencia y Tecnología de Materiales y a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI).

REFERENCIAS

Acosta, L. (2007). *El selenio*. Laboratorios Santa Elena. https://www.produccion-animal.com.ar/suplementacion_mineral/95-selenio.pdf

Bisht, N., Phalswal, P., & Khanna, P. K. (2022). Selenium nanoparticles: A review on synthesis and biomedical applications. *Materials Advances, 3*, 1415–1431. https://doi.org/10.1039/D1MA00639H

Boverhof, D. R., Bramante, C. M., Butala, J. H., Clancy, S. F., Lafranconi, M., West, J., & Gordon, S. C. (2015). Comparative assessment of nanomaterial definitions and safety evaluation considerations. *Regulatory Toxicology and Pharmacology, 73*(1), 137–150. https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2015.06.001

Chen, T., Wong, Y. S., Zheng, W., Bai, Y., & Huang, L. (2008). Selenium nanoparticles fabricated in *Undaria pinnatifida* polysaccharide solutions induce mitochondria-mediated apoptosis in A375 human melanoma cells. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 67*(1), 26–31. https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2008.07.010

Cremonini, E., Zonaro, E., Donini, M., Lampis, S., Boaretti, M., Dusi, S., Melotti, P., Lleo, M. M., & Vallini, G. (2016). Biogenic selenium nanoparticles: Characterization,

antimicrobial activity and effects on human dendritic cells and fibroblasts. *Microbial Biotechnology, 9*(6), 758–771. https://doi.org/10.1111/1751-7915.12374

Fajt, Z., Drabek, J., Steinhauser, L., & Svoboda, M. (2009). The significance of pork as a source of dietary selenium—An evaluation of the situation in the Czech Republic. *Neuro Endocrinology Letters, 30*(Suppl. 1), 17–21.

Forootanfar, H., Adeli-Sardou, M., Nikkhoo, M., Mehrabani, M., Amir-Heidari, B., Shahverdi, A. R., & Shakibaie, M. (2014). Antioxidant and cytotoxic effect of biologically synthesized selenium nanoparticles in comparison to selenium dioxide. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 28*(1), 75–79. https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2013.07.005

Hassanin, K. M. A., Abd El-Kawi, S. H., & Hashem, K. S. (2013). The prospective protective effect of selenium nanoparticles against chromium-induced oxidative and cellular damage in rat thyroid. *International Journal of Nanomedicine, 8*, 1713–1720. https://doi.org/10.2147/IJN.S42736

Hernández-Mendoza, H., & Rios-Lugo, M. J. (2009). Rol biológico del selenio en el humano. *Química Viva, 8*(2), 64–79. https://www.redalyc.org/pdf/863/86311783003.pdf

Hosnedlova, B., Kepinska, M., Skalickova, S., Fernandez, C., Ruttkay-Nedecky, B., Peng, Q., Baron, M., Melcova, M., Opatrilova, R., Zidkova, J., Bjørklund, G., Sochor, J., & Kizek, R. (2018). Nano-selenium and its nanomedicine applications: A critical review. *International Journal of Nanomedicine, 13*, 2107–2128. https://doi.org/10.2147/IJN.S157541

Huang, B., Zhang, J., Hou, J., & Chen, C. (2003). Free radical scavenging efficiency of Nano-Se in vitro. *Free Radical Biology and Medicine, 35*(7), 805–813. https://doi.org/10.1016/S0891-5849(03)00428-3

Huang, D., Ou, B., & Prior, R. L. (2005). The chemistry behind antioxidant capacity assays. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 53*(6), 1841–1856. https://doi.org/10.1021/jf030723c

Ikram, M., Javed, B., Raja, N. I., & Mashwani, Z. U. R. (2021). Biomedical potential of plant-based selenium nanoparticles: A comprehensive review on therapeutic and mechanistic aspects. *International Journal of Nanomedicine, 16*, 249–268. https://doi.org/10.2147/IJN.S295053

Kathirvelu, S., D'Souza, L., & Dhurai, B. (2008). Nanotechnology applications in textiles. *Indian Journal of Science and Technology, 1*(5), 1–10. https://doi.org/10.17485/ijst/2008/v1i5.14

Khurana, A., Tekula, S., Saifi, M. A., Venkatesh, P., & Godugu, C. (2019). Therapeutic applications of selenium nanoparticles. *Biomedicine & Pharmacotherapy, 111*, 802–812. https://doi.org/10.1016/j.biopha.2018.12.146

Luo, H., Wang, F., Bai, Y., Chen, T., & Zheng, W. (2012). Selenium nanoparticles inhibit the growth of HeLa and MDA-MB-231 cells through induction of S phase arrest. *Colloids*

and Surfaces B: Biointerfaces, 94, 304–308. https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2012.02.006

Panahi-Kalamuei, M., Salavati-Niasari, M., & Hosseinpour-Mashkani, S. M. (2014). Facile microwave synthesis, characterization, and solar cell application of selenium nanoparticles. *Journal of Alloys and Compounds, 617*, 627–632. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.07.174

Pandey, P., & Dahiya, M. (2016). A brief review on inorganic nanoparticles. *Journal of Critical Reviews, 3*(3), 18–26.

Petrović, M. (2021). Selenium: Widespread yet scarce, essential yet toxic. *ChemTexts, 7*(2), Article 11. https://doi.org/10.1007/s40828-021-00137-y

Pillai, R., Uyehara-Lock, J. H., & Bellinger, F. P. (2014). Selenium and selenoprotein function in brain disorders. *IUBMB Life, 66*(4), 229–239. https://doi.org/10.1002/iub.1262

Rayman, M. P. (2000). The importance of selenium to human health. *The Lancet, 356*(9225), 233–241. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(00)02490-9

Sakr, T. M., Korany, M., & Katti, K. V. (2018). Selenium nanomaterials in biomedicine—An overview of new opportunities in nanomedicine of selenium. *Journal of Drug Delivery Science and Technology, 46*, 223–233. https://doi.org/10.1016/j.jddst.2018.05.023

Shakibaie, M., Forootanfar, H., Golkari, Y., Mohammadi-Khorsand, T., & Shakibaie, M. R. (2015). Anti-biofilm activity of biogenic selenium nanoparticles and selenium dioxide against clinical isolates of *Staphylococcus aureus, Pseudomonas aeruginosa*, and *Proteus mirabilis*. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 29*, 235–241. https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2014.07.020

Shi, L., Xun, W., Yue, W., Zhang, C., Ren, Y., Shi, L., Wang, Q., Yang, R., & Lei, F. (2011). Effect of sodium selenite, Se-yeast and nano-elemental selenium on growth performance, Se concentration and antioxidant status in growing male goats. *Small Ruminant Research, 96*(1), 49–52. https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2010.11.005

Trabelsi, H., Azzouz, I., Ferchichi, S., Tebourbi, O., Sakly, M., & Abdelmelek, H. (2013). Nanotoxicological evaluation of oxidative responses in rat nephrocytes induced by cadmium. *International Journal of Nanomedicine, 8*, 3447–3453. https://doi.org/10.2147/IJN.S49323

Yu, B., Zhang, Y., Zheng, W., Fan, C., & Chen, T. (2012). Positive surface charge enhances selective cellular uptake and anticancer efficacy of selenium nanoparticles. *Inorganic Chemistry, 51*(16), 8956–8963. https://doi.org/10.1021/ic301050v

Zafar, K. S., Siddiqui, A., Sayeed, I., Ahmad, M., Salim, S., & Islam, F. (2003). Dose-dependent protective effect of selenium in rat model of Parkinson's disease: Neurobehavioral and neurochemical evidences. *Journal of Neurochemistry, 84*(3), 438–446. https://doi.org/10.1046/j.1471-4159.2003.01531.x

Zhang, J.-S., Gao, X.-Y., Zhang, L.-D., & Bao, Y.-P. (2001). Biological effects of a nano red elemental selenium. *BioFactors, 15*(1), 27–38. https://doi.org/10.1002/biof.5520150103

Zhang, J., Wang, X., & Xu, T. (2008). Elemental selenium at nano size (Nano-Se) as a potential chemopreventive agent with reduced risk of selenium toxicity: Comparison with Se-methylselenocysteine in mice. *Toxicological Sciences, 101*(1), 22–31. https://doi.org/10.1093/toxsci/kfm221

DIVULGACIÓN

INFLUENCIA DE LOS SUPERPLASTIFICANTES SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CEMENTO PORTLAND COMPUESTO

INFLUENCE OF SUPERPLASTICIZERS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF PORTLAND COMPOSITE CEMENT

MARTÍNEZ GUTIÉRREZ, Myriam Itzel [1]

GALLARDO HEREDIA, Marisol [1]

LÓPEZ BADILLO, Claudia Magdalena [1]

CRUZ ARGÜELLO, Julio César [2]

MÚZQUIZ RAMOS, Elia Martha [1]

RESUMEN

El presente trabajo describe la influencia de los superplastificantes (SP) sobre las propiedades mecánicas y trabajabilidad del cemento Portland compuesto (CPC). Estos aditivos químicos son utilizados para reducir el contenido de agua sin afectar la hidratación del cemento y conjuntamente mejorar la fluidez, resistencia y durabilidad del material. Se describen los principales tipos de superplastificantes: lignosulfatos, formaldehídos de naftaleno sulfonado, formaldehídos de melamina sulfonada y éteres policarboxílicos. Estos últimos muestran un desempeño superior al mantener la trabajabilidad y aumentar la resistencia del material con porcentajes menores al 3 %. Además, se revisaron diversos estudios que demuestran la eficacia de los SP en mezclas de CPC con materiales alternativos, como cenizas volantes, escorias o puzolanas, ya que estos últimos modifican la reología y la cinética de hidratación, lo que hace más evidente el efecto del aditivo sobre la trabajabilidad y las propiedades mecánicas (Argın & Uzal, 2026). En general, una aplicación adecuada de SP reduce la demanda de agua y mejora la trabajabilidad de sistemas cementicios, este artículo aporta una visión integradora que explica, desde fundamentos químicos, por qué su presencia resulta esencial para controlar la dispersión de partículas, la hidratación temprana y el uso eficiente del agua en sistemas cementicios.

Palabras clave: *cemento Portland compuesto; materiales cementantes; propiedades mecánicas; trabajabilidad; aditivos químicos.*

1. Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila. Saltillo, Coahuila, México.

2. Instituto Tecnológico de Chetumal, Tecnológico Nacional de México. Chetumal, Quintana Roo, México.

Correspondencia
emuzquiz@uadec.edu.mx
https://orcid.org/0000-0001-8626-678X

Fecha de recepción
28 de noviembre de 2025.
Fecha de aceptación
14 de mayo de 2026.

ABSTRACT

This paper describes the influence of superplasticizers (SP) on the mechanical properties and workability of Portland Composite Cement (PCC). These chemical additives are used to reduce water content without affecting cement hydration while also improving the material's flowability, strength, and durability. The main types of superplasticizers are described: lignosulfates, sulfonated naphthalene formaldehyde, sulfonated melamine formaldehyde, and polycarboxylic ethers. The latter shows superior performance by maintaining workability and increasing the material's strength at percentages below 3 %. Furthermore, several studies demonstrating the effectiveness of SP in PCC mixtures with alternative materials, such as fly ash, slag, or pozzolans, were reviewed. These alternative materials modify the rheology and hydration kinetics, making the effect of the additive on workability and mechanical properties more evident (Argın & Uzal, 2026). In general, proper application of SP reduces water demand and improves the workability of cementitious systems. This article provides an integrative view that explains, from chemical fundamentals, why its presence is essential to control particle dispersion, early hydration, and efficient water use in cementitious systems.

Keywords: *Portland composite cement; cementitious materials; mechanical properties; workability; chemical additives.*

1. INTRODUCCIÓN

El cemento Portland compuesto (CPC) es uno de los materiales de construcción más utilizados en el mundo debido a su capacidad para alcanzar gran resistencia y durabilidad una vez endurecido (Orozco et al., 2018). Estas propiedades dependen de factores como la relación agua/cemento, la calidad de las materias primas y la incorporación de aditivos químicos como retardantes, acelerantes del fraguado y superplastificantes. Estos últimos, mejoran la trabajabilidad del material sin aumentar la cantidad de agua, mejorando la resistencia mecánica ya que no alteran el proceso de hidratación (X. H. Wang et al., 2024). Los superplastificantes (SP) actúan sobre las partículas del cemento reduciendo las fuerzas de atracción mediante mecanismos fisicoquímicos, principalmente las fuerzas estéricas y/o electrostáticas. Eso permite reducir el contenido de agua necesario para

obtener una mezcla con fluidez lo que da aumento a la resistencia mecánica del material (Nkinamubanzi et al., 2016). El uso de SP ha avanzado desde los primeros lignosulfonatos hasta las actuales formulaciones a base de policarboxilatos. Estos avances han contribuido al desarrollo de concretos con mejores propiedades mecánicas comparadas al concreto convencional, como el concreto de ultra alto desempeño (UHPC) o el concreto autocompactante (Akhnoukh & Buckhalter, 2021). Además de mejorar la fluidez de la mezcla, el uso adecuado de SP influye en parámetros críticos como la distribución del tamaño de partículas, la resistencia inicial y final, la retracción y el módulo de elasticidad. Su eficiencia depende de variables como el tipo de cemento, la dosis empleada y la compatibilidad química entre ambos. Investigaciones recientes han demostrado que una dosificación óptima de SP puede reducir la variabilidad del concreto y favorecer una microestructura más densa y homogénea (Rao et al., 2024). El principal objetivo de este artículo es dar a conocer, de manera general, el papel de los SP en el cemento y cómo estos aditivos mejoran su trabajabilidad, resistencia y durabilidad.

2. Cemento Portland compuesto

El CPC es un material aglutinante esencial en la industria de la construcción, el cual es utilizado para la elaboración de concretos y morteros. La importancia de este material se debe a su capacidad para reaccionar químicamente con el agua formando reacciones de hidratación, que le permiten endurecer y adquirir resistencia con el paso del tiempo (Bullard et al., 2011; John & Lothenbach, 2023; Xu et al., 2024).

El principal componente del CPC es el clinker, el cual está constituido por cuatro fases minerales: alita (C_3S), belita (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) y ferrita tetracálcica (C_4AF). En la tabla 1, se describe el papel de cada fase en el proceso de hidratación (Elsen et al., 2011; Ochoa Luna & Flores B., 1994).

En la actualidad, en algunos casos también se le adicionan materiales como escorias de alto horno o cenizas volantes para mejorar su desempeño, a raíz de esto, se modificó el nombre de cemento Portland ordinario a cemento Portland compuesto (Cárdenas Pulido et al., 2016; Saha, 2018; F. Wang et al., 2024).

Tabla 5. Composición del CPC.

Fase/Compuesto	Fórmula química/ Composición	Proporciones (%)	Aportación
Alita (silicato tricálcico C_3S)	Ca_3SiO_5	~50-70	Fraguado rápido y desarrollo de la resistencia inicial.
Belita (silicato dicálcico C_2S)	Ca_2SiO_4	~15-30	Aumento de la resistencia a largo plazo.
Aluminato tricálcico (C_3A)	$Ca_3Al_2O_6$	~5-10	Reacciones iniciales de hidratación.
Ferrita tetracálcica (C_4AF)	$Ca_2(Al, Fe)_2O_5$	~5-15	Estabilidad química del cemento.
Yeso	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	~3-5	Tiempo de fraguado.
Cenizas volantes, escorias de alto horno, entre otros.	(SiO_2-Al_2O_3-Fe_2O_3), (CaO-SiO_2-Al_2O_3-MgO)	~0-10	Mejoran la trabajabilidad, aumentan la durabilidad y reducen el calor de hidratación.

Tomado de: Elsen et al. (2011); Ochoa Luna & Flores B. (1994).

3. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS CEMENTOS

Estas son fundamentales para determinar el desempeño real de un cemento, ya que existe una conexión entre la resistencia mecánica y la durabilidad dado que un material estructuralmente apto suele ser más denso y resistente a agentes agresivos como ácidos, sulfatos y cloruros (Tahwia et al., 2023). Entre las propiedades más relevantes de los cementos destacan la resistencia a la compresión, a la tracción y a la flexión y el módulo de elasticidad. La resistencia a la compresión es el parámetro más utilizado para indicar si el material cuenta con una buena calidad, determinando la capacidad de la estructura para soportar cargas. Esta propiedad depende de factores como la relación agua/cemento, la porosidad del material y la microestructura que se desarrolla durante el tiempo de curado (Gaonkar & Madhu, 2021). En la

actualidad, los aditivos químicos (superplastificantes, plastificantes) son utilizados ampliamente en el desarrollo de materiales cementantes ya que son capaces de modificar y mejorar estas propiedades. Estos, al ser incorporados en pequeñas cantidades, influyen directamente en las propiedades del cemento como la trabajabilidad, la consistencia, el tiempo de fraguado, la densidad y la hidratación (Cheung et al., 2011).

4. SUPERPLASTIFICANTES

Los superplastificantes (SP) son aditivos químicos que se utilizan para aumentar la fluidez y la trabajabilidad de mezclas cementicias, capaces de reducir el contenido de agua en ~30 %, mejorando su desempeño y representando un beneficio ambiental importante al disminuir el consumo de agua asociado a la producción de estas mezclas (Ramachandran & Malhotra, 1996). Estos consisten en polímeros de alto peso molecular solubles en agua. La solubilidad está determinada por la presencia de grupos hidroxilos (-OH), sulfonatos (R-SO_3-) o carboxilos (–COOH), los cuales están unidos a la cadena principal del polímero (Darweesh, 2016).

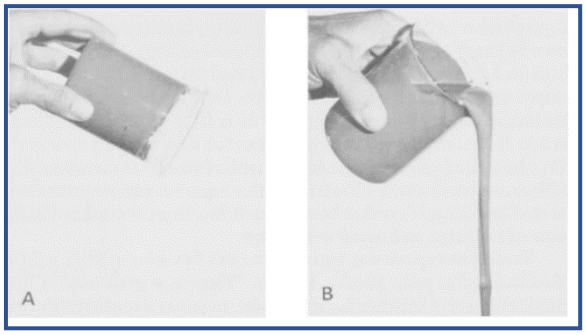


Figura 1. Efecto de superplastificantes en el cemento. A: Cemento + agua. B: Cemento + agua + superplastificante.
Tomado de Ramachandran y Alhotra (1996).

Su mecanismo de acción se basa en sus estructuras moleculares y en las interacciones fisicoquímicas, dispersando las partículas del cemento sin aumentar el contenido de agua, actuando por repulsión electrostática y/o por efecto estérico, lo que rompe los flóculos y libera el agua atrapada en ellos. Esto permite reducir la relación agua/cemento, aumentar la fluidez y mejorar las resistencias mecánicas y la durabilidad del material, además de influir en la hidratación y el tiempo de fraguado (Nkinamubanzi et al., 2016).

4.1 IPOS DE SUPERPLASTIFICANTES

Los SP se clasifican en cuatro tipos principales: lignosulfatos (LS), formaldehído de naftaleno sulfonado (SNF), formaldehído de melamina sulfonada (SMF) y éter policarboxílico (PCE). Los tipos de LS, SNF y SMF funcionan según el principio de repulsión electroestática, mientras que, en los PCE el mecanismo principal es el efecto de repulsión estérico (Sathyan y Anand, 2019).

- Lignosulfatos (ls) Fueron los primeros dispersantes agregados como aditivos reductores de agua en el concreto. Se han utilizado desde la década de 1930. Se obtienen como subproductos de la pasta de sulfito de la madera, que se utiliza para separar fibras de celulosa puras mediante la disolución de hemicelulosa y lignina (Gelardi et al., 2016). Contienen numerosos grupos funcionales como ácido carboxílico (–COOH), fenol (C_6H_5OH), ácido sulfónico (R-SO_3H), entre muchos otros; al igual que diversas combinaciones de estos (figura 2). Al retardar el fraguado del cemento, puede ser favorable en ciertas condiciones climáticas, sin embargo, el tiempo de fraguado podría extenderse hasta tiempos imprácticos (Flatt & Schober, 2012).

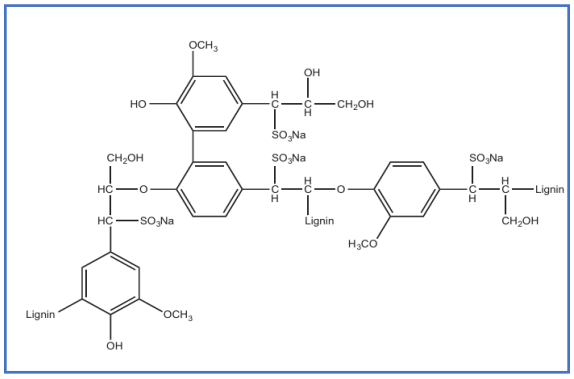


Figura 2. Estructura química de un LS.
Tomado de Gelardi et al. (2016).

- Formaldehídos de naftaleno sulfonado (snf). Se desarrollaron inicialmente en la década de 1930. Afinales de 1960 fueron introducidos en el mercado japonés como aditivos para concreto (Gelardi et al., 2016). Su capacidad de dispersión es mayor que la de los LS, lo que permite una mayor reducción de agua, hasta de 30 % (Nkinamubanzi et al., 2016). Se producen mediante la reacción de naftaleno sulfónico con ácido sulfúrico para obtener β-naftaleno sulfónico, para posteriormente ser condensado con formaldehído en medio acuoso formando el SNF (figura 3). Sin embargo, no todos los

cementos son compatibles con todos los SNF (Flatt & Schober, 2012). Tienen buena eficacia inicial, pero su efecto puede disminuir con el tiempo. Presentan una interacción débil con los minerales arcillosos.

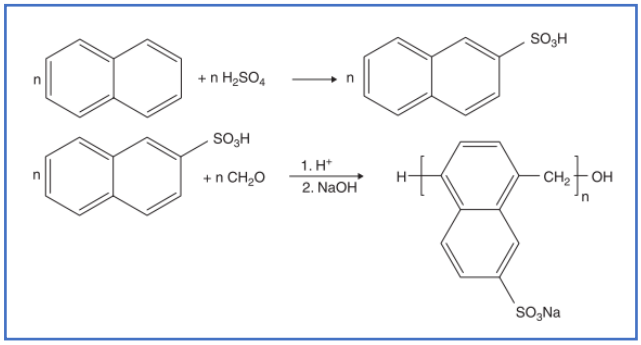


Figura 3. Síntesis para la preparación de SNF.

Tomado de Gelardi et al. (2016).

- Formaldehídos de melamina sulfonada (SMF). Se han utilizado desde mediados de 1970 como SP para concretos. Son producidos por una reacción de condensación de melamina con sulfato y formaldehído (figura 4) (Gelardi et al., 2016). En comparación con el SNF, la reducción de agua es prácticamente la misma, pero la vida útil del SNF es ligeramente mejor. Los SNF suelen ser de los SP de los más utilizados en la industriadel concreto ya que no retardan el fraguado del cemento (Flatt & Schober, 2012).

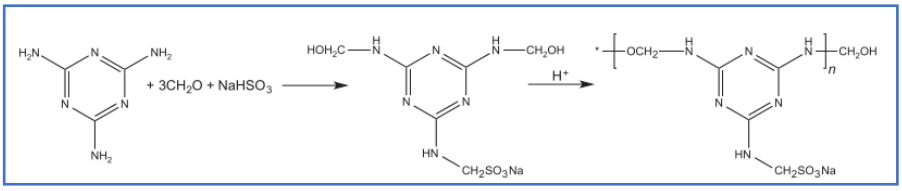


Figura 4. Secuencia de reacción para la síntesis de SMF.
Tomado de Gelardi et al. (2016).

ÉTERES POLICARBOXÍLICOS (PCE):

Se desarrollaron en Japón a mediados de 1980, en comparación con los SP a base de LS, SNF y SMF, presentan la capacidad de mantener la trabajabilidad del concreto y dispersar las partículas de cemento a bajas dosis sin aumentar los periodos de fraguado (Rao et al., 2024). Tienen estructuras químicas versátiles y pueden lograr una reducción de agua de hasta el 40 %, pero generalmente presentan una baja tolerancia a los minerales arcillosos (Nkinamubanzi et al., 2016). La estructura de los SP en forma de "peine" (figura 5) consiste en una cadena principal que contiene grupos carboxílicos,

los cuales ceden carga negativa a esta, a la que se unen cadenas laterales de poliéteres. La cadena principal con carga negativa es responsable de la adsorción del SP sobre las partículas de cemento con carga positiva (Gelardi et al., 2016).

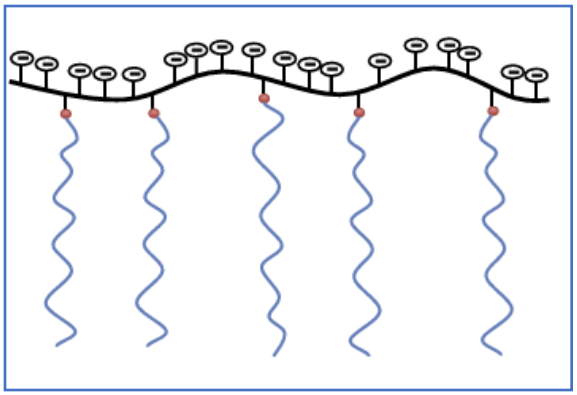


Figura 5. Estructura en forma de peine de un PCE. Tomado de Gelardi et al. (2016).

APLICACIONES DE LOS SUPERPLASTIFICANTES

El uso de SP en mezclas cementicias ha sido ampliamente estudiado desde concretos de alta resistencia hasta mezclas con agregados alternativos. En los últimos años, diversas investigaciones han explorado nuevas formulaciones de estos aditivos, demostrando su capacidad para mejorar la durabilidad y desempeño del concreto.

Se ha observado que los SP no solo aumentan la trabajabilidad de la mezcla, sino que también promueven una hidratación más eficiente y una reducción significativa de la porosidad, lo que mejora la resistencia y la durabilidad a largo plazo. Esto coincide con el trabajo de Chen et al. (2022), quienes emplearon mezclas cementantes formadas por CPC y ceniza volante, incorporando SP tipo PCE. En su estudio evaluaron el comportamiento de estas mezclas en términos de hidratación, microestructura, resistencia mecánica e impermeabilidad.

Por su parte, Li et al. (2022) estudiaron cómo el contenido y la finura del metacaolín afectan la reactividad, trabajabilidad y resistencia de cementos con arcillas calcinadas y SP de HPEG (Éter metalil poli(etilenglicol)) PCE. También encontraron que un mayor contenido de metacaolín aumenta la reactividad y la resistencia inicial del material, pero también incrementa la cantidad de agua y la dosis requerida de PCE. La finura influye principalmente en la

cantidad de agua, mientras que el contenido de metacaolín determina la cantidad de PCE requerida.

Diversas investigaciones se han centrado en comparar el comportamiento de distintos tipos de SP y su interacción con otros aditivos empleados en la formulación del cemento. En este contexto, Kapeluszna y Chrabąszcz (2023) investigaron cómo interactúan los SP de PCE y SNF con ayudantes de molienda como TEA (trietanolamina) y glicol en cementos con diferentes contenidos de C_3A. También en esta investigación analizaron sus propiedades de hidratación, reología, resistencia mecánica, tensión superficial y contenido de aire. Los resultados mostraron que la TEA acelera la hidratación y disminuye la eficacia de los SP, en especial de SNF. En cementos con bajo C_3A el PCE fue más eficiente, mientras que en los de alto C_3A ambos aditivos tuvieron efectos similares. También observaron que las combinaciones de TEA y SNF aumentan el aire atrapado y modifican la estructura del poro, afectando la trabajabilidad y resistencia del material.

Cao et al. (2023) desarrollaron un SP diseñado para ser eficaz en concretos que incorporan ceniza volante y arena manufacturada, materiales que dificultan la trabajabilidad de la mezcla. Sus ensayos demostraron que este nuevo aditivo permitió mantener la fluidez de la mezcla, reducir la exudación y mejorar la resistencia mecánica, lo que lo convierte en una solución prometedora para la producción de concretos con materiales alternativos sin comprometer la calidad del producto final.

Zhang y Sun (2023) abordaron la aplicación de SP en sistemas activados alcalinamente con base en ceniza volante. Evaluaron propiedades reológicas como la viscosidad y el esfuerzo de cedencia, así como el mecanismo de adsorción de los SP en presencia de diferentes activadores alcalinos. Los resultados indicaron que, aunque estos aditivos pueden ser eficaces en este tipo de sistemas, su rendimiento depende significativamente del tipo de activador utilizado y de la interacción química con los productos de reacción formados.

Huang et al. (2024) analizaron el uso de SP para optimizar el cemento reciclado activado térmicamente (RC). Este tipo de material posee una superficie específica mayor y, por lo tanto, una demanda de agua elevada, requiriendo aditivos químicos con capacidades de dispersión superiores. Examinaron diversos mecanismos de acción, como el impedimento estérico y la repulsión electroestática para identificar qué estructuras moleculares de los

SP son más compatibles con la composición química del RC. Finalmente, proponen que el uso de estos aditivos es fundamental para mejorar la durabilidad y la resistencia mecánica de concretos.

Valdivieso-Galarza et al. (2025) evaluaron el efecto que causa los SP en la resistencia a la compresión y el porcentaje de porosidad del concreto. Trabajaron con diferentes relaciones agua/cemento (a/c) donde mantuvieron constante la cantidad de SP y el contenido de cemento. Obtuvieron resultados los que la incorporación del aditivo en mezclas de relación a/c baja logró optimizar significativamente las propiedades del concreto y a la vez redujo su porosidad por lo que la utilización de superplastificantes en dosis correctas, potencia significativamente las propiedades del concreto.

En conjunto, estos estudios demuestran que los superplastificantes desempeñan un papel fundamental en la optimización del comportamiento del cemento. Su correcta aplicación permite no solo mejorar la trabajabilidad de la mezcla, sino también influir positivamente en la resistencia mecánica, la densidad de la microestructura y la durabilidad del concreto, tanto en sistemas convencionales como en formulaciones con materiales suplementarios o alternativos.

CONCLUSIONES

El análisis realizado permitió comprender, de manera general, el papel fundamental de los superplastificantes en el CPC y su influencia en las propiedades mecánicas, donde su correcta dosificación y tipo específico influyen en el rendimiento del material, permitiendo el desarrollo de materiales más resistentes, duraderos y de mejor calidad. Actualmente, los superplastificantes a base de policarboxilato (PCE) se han convertido en los más utilizados dentro de la industria de concreto, gracias a su alto desempeño en comparación con otros tipos. Su estructura molecular permite una dispersión más eficiente de las partículas del cemento, favoreciendo una mayor trabajabilidad y el incremento en las resistencias mecánicas del material. Su incorporación ha permitido el desarrollo de materiales cementicios más resistentes, duraderos y de mayor calidad, empleados en la industria de la construcción.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Coahuila y al programa de Maestría en Ciencia y Tecnología de los Materiales por el apoyo brindado para la realización de este escrito, así como a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca de maestría N° 4063772.

REFERENCIAS

Akhnoukh, A. K., & Buckhalter, C. (2021). Ultra-high-performance concrete: Constituents, mechanical properties, applications and current challenges. *Case Studies in Construction Materials, 15*, e00559. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00559

Argın, G., & Uzal, B. (2026). Compatibility of superplasticizers with natural pozzolan blended cement: Multi-criteria compatibility index through rheology and hydration kinetics. *European Journal of Environmental and Civil Engineering, 30*(1), 1–30. https://doi.org/10.1080/19648189.2025.2545452

Bullard, J. W., Jennings, H. M., Livingston, R. A., Nonat, A., Scherer, G. W., Schweitzer, J. S., Scrivener, K. L., & Thomas, J. J. (2011). Mechanisms of cement hydration. *Cement and Concrete Research, 41*(12), 1208–1223. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.09.011

Cárdenas Pulido, J., Lizarazo-Marriaga, J., & Aperador Chaparro, W. (2016). Comportamiento mecánico de sistemas cementantes binarios (cemento Portland–ceniza volante–escoria de alto horno). *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, 36*(1), 78–98. https://doi.org/10.5281/zenodo.10032113

Cao, P., Huang, X., Bao, S., & Yang, J. (2023). Influence of high-robustness polycarboxylate superplasticizer on the performances of concrete incorporating fly ash and manufactured sand. *Fluid Dynamics & Materials Processing, 19*(8), 2041–2051. https://doi.org/10.32604/fdmp.2023.027399

Chen, J., Zhu, Y., Du, W., Li, M., Wang, Y., Zhang, C., Shi, M., & Xue, B. (2022). Influence of polycarboxylate superplasticizer on the properties of cement-fly ash cementitious materials and concrete. *Sustainability, 14*(20), 13440. https://doi.org/10.3390/su142013440

Cheung, J., Jeknavorian, A., Roberts, L., & Silva, D. (2011). Impact of admixtures on the hydration kinetics of Portland cement. *Cement and Concrete Research, 41*(12), 1289–1309. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.005

Darweesh, H. H. M. (2016). Black liquor waste as a cement admixture or cement and concrete admixtures. In F. Pacheco-Torgal, V. Ivanov, N. Karak, & H. Jonkers (Eds.), *Biopolymers and biotech admixtures for eco-efficient construction materials* (pp. 99–130). Woodhead Publishing.

Elsen, J., Mertens, G., & Snellings, R. (2011). Portland cement and other calcareous hydraulic binders: History, production and mineralogy. *European Mineralogical Union Notes in Mineralogy, 9*, 441–479. https://doi.org/10.1180/EMU-notes.9.11

Flatt, R., & Schober, I. (2012). Superplasticizers and the rheology of concrete. In N. Roussel (Ed.), *Understanding the rheology of concrete* (pp. 144–208). Woodhead Publishing.

Gaonkar, S., & Madhu. (2021). Impact of different water-cement ratios on concrete strength: A review. *World Journal of Advanced Research and Reviews, 9*(1), 319–328. https://doi.org/10.30574/wjarr.2021.9.1.0037

Gelardi, G., Mantellato, S., Marchon, D., Palacios, M., Eberhardt, A. B., & Flatt, R. J. (2016). Chemistry of chemical admixtures. In P.-C. Aïtcin & R. J. Flatt (Eds.), *Science and technology of concrete admixtures* (pp. 149–218). Woodhead Publishing.

Huang, R., Xu, L., Xu, Z., Zhang, Q., & Wang, J. (2024). A review on concrete superplasticizers and their potential applications for enhancing the performance of thermally activated recycled cement. *Materials, 17*(17), 4170. https://doi.org/10.3390/ma17174170

John, E., & Lothenbach, B. (2023). Cement hydration mechanisms through time – a review. *Journal of Materials Science, 58*(24), 9805–9833. https://doi.org/10.1007/s10853-023-08651-9

Kapeluszna, E., & Chrabąszcz, K. (2023). Mutual compatibility of superplasticizers (PC, SNF), grinding aids (TEA, glycol) and C3A in Portland cement systems – Hydration, rheology, physical properties and air void characteristics. *Construction and Building Materials, 373*, 130877. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130877

Li, R., Lei, L., & Plank, J. (2022). Impact of metakaolin content and fineness on the behavior of calcined clay blended cements admixed with HPEG PCE superplasticizer. *Cement and Concrete Composites, 133*, 104654. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104654

Nkinamubanzi, P. C., Mantellato, S., & Flatt, R. J. (2016). Superplasticizers in practice. In P.-C. Aïtcin & R. J. Flatt (Eds.), *Science and technology of concrete admixtures* (pp. 353–377). Woodhead Publishing.

Ochoa Luna, R., & Flores B., E. (1994). Química del cemento: Parte I. *Revista de Química, 8*(2), 207–214. https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/5537

Orozco, M., Avila, Y., Restrepo, S., & Parody, A. (2018). Factores influyentes en la calidad del concreto: Una encuesta a los actores relevantes de la industria del hormigón. *Revista*

Ingeniería de Construcción, 33(2), 161–172. https://doi.org/10.4067/S0718-50732018000200161

Ramachandran, V. S., & Malhotra, V. M. (1996). Superplasticizers. In V. S. Ramachandran (Ed.), *Concrete admixtures handbook* (2nd ed., pp. 410–517). William Andrew Publishing.

Rao, U. V. N., Kumar, N. V. S., Kavitha, C., Madhavi, Y., & Chowdary, P. S. (2024). Polycarboxylate superplasticizers used in concrete: A review. *International Journal of Experimental Research and Review, 38*, 69–88. https://doi.org/10.52756/ijerr.2024.v38.007

Saha, A. K. (2018). Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete. *Sustainable Environment Research, 28*(1), 25–31. https://doi.org/10.1016/j.serj.2017.09.001

Sathyan, D., & Anand, K. B. (2019). Influence of superplasticizer family on the durability characteristics of fly ash incorporated cement concrete. *Construction and Building Materials, 204*, 864–874. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.171

Tahwia, A. M., Fouda, R. M., Abd Elrahman, M., & Youssf, O. (2023). Long-term performance of concrete made with different types of cement under severe sulfate exposure. *Materials, 16*(1), 240. https://doi.org/10.3390/ma16010240

Valdivieso-Galarza, J. A., Ureta-Centeno, A. A., & Guerra-Mera, J. C. (2025). Influencia del aditivo superplastificante en la resistencia y porosidad del hormigón con varias relaciones agua-cemento. *Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación, 8*(16), 16–36. https://doi.org/10.46296/ig.v8i16.0281

Wang, F., Du, H., Zheng, Z., Xu, D., Wang, Y., Li, N., Ni, W., & Ren, C. (2024). The impact of fly ash on the properties of cementitious materials based on slag-steel slag-gypsum solid waste. *Materials, 17*(19), 4696. https://doi.org/10.3390/ma17194696

Wang, X.-H., Fang, Z.-C., & Zheng, L. (2024). Effect of dose and types of the water reducing admixtures and superplasticizers on concrete strength and durability behaviour: A review. *Journal of Civil Engineering and Management, 30*(1), 33–48. https://doi.org/10.3846/jcem.2024.20145

Xu, X., Qi, C., Aretxabaleta, X. M., Ma, C., Spagnoli, D., & Manzano, H. (2024). The initial stages of cement hydration at the molecular level. *Nature Communications, 15*(1), 2731. https://doi.org/10.1038/s41467-024-46962-w

Zhang, D., & Sun, X. (2023). Efficiencies of Super-Plasticizer on Rheology Properties of Fly Ash-Based Alkali-Activated Materials with Different Ms Waterglass Activators. *Polymers, 15*(9): 2054. https://doi.org/10.3390/polym15092054

PARRAS: AGUA, VINO Y CIVILIZACIÓN EN UN OASIS DEL NORTE DE MÉXICO

PARRAS: WATER, WINE AND CIVILIZATION IN AN OASIS OF NORTHERN MEXICO

PERALES HUERTA, Adolfo [1]

SANDOVAL CORTÉS, José [2]

LOREDO TREVIÑO, Araceli [2]

GOVEA SALAS, Mayela [2]

GOMES ARAÚJO, Rafael [3]

RESUMEN

El Valle de Parras constituye un caso singular en el norte de México, donde la relación entre el agua, el entorno natural y la acción humana ha dado lugar a un paisaje cultural único. Ubicado en una región semidesértica, este oasis ha sido históricamente posible gracias a la presencia de fuentes subterráneas, manantiales y sistemas tradicionales de captación y conducción del agua, que han permitido el asentamiento humano y el desarrollo de actividades agrícolas. A lo largo de los siglos, la disponibilidad de agua en Parras no solo hizo posible la vida en un entorno árido, sino que también favoreció la consolidación de una de las tradiciones vitivinícolas más antiguas del continente. Desde finales del siglo XVI, con el establecimiento de haciendas agrícolas y vitivinícolas como la Hacienda de Arriba (1593) y la Hacienda de San Lorenzo (1597), se desarrolló una actividad que, con el tiempo, se convertiría en uno de los principales rasgos identitarios de la región. La producción de vino, más allá de su dimensión económica, ha sido un elemento clave en la configuración de la identidad local, articulando prácticas productivas, saberes técnicos y formas de organización social vinculadas al uso eficiente del agua. Este trabajo propone una aproximación divulgativa a la manera en que el agua, la vitivinicultura, el paisaje y la sociedad se entrelazan en Parras, destacando que su singularidad no radica únicamente en la producción de vino, sino también en la construcción histórica de una cultura del agua. Dicha cultura ha permitido transformar un entorno adverso en un espacio productivo, habitable y simbólicamente significativo. En este sentido, Parras puede entenderse como un ejemplo representativo de cómo la interacción sostenida entre la naturaleza y la sociedad da lugar a paisajes culturales complejos, donde los recursos naturales, el conocimiento tradicional y la actividad humana convergen para generar identidad, permanencia y desarrollo en condiciones ambientales desafiantes.

Palabras clave: *Parras; vitivinicultura; agua; paisaje cultural; oasis.*

1. Maestría en Vitivinicultura, Centro de Estudios e Investigaciones Interdisciplinarios, Universidad Autónoma de Coahuila, Saltillo, Coahuila, México.

2. Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila. Saltillo, Coahuila, México.

3. Centro de Investigación en Genética y Genómica (CIGEN), Universidad Autónoma de Coahuila. Saltillo, Coahuila, México.

Correspondencia
rafael.araujo@uadec.edu.mx
https://orcid.org/0000-0003-3184-169X

Fecha de recepción
13 de mayo de 2026.
Fecha de aceptación
7 de agosto de 2026.

Este artículo fue sometido a revisión por pares doble ciego

ABSTRACT

The Parras Valley is a unique case in northern Mexico, where the relationship between water, the natural environment, and human activity has given rise to a singular cultural landscape. Located in a semi-desert region, this oasis has historically been sustained by underground and natural springs, along with traditional water collection and distribution systems, which have enabled human settlement and agricultural development. Over the centuries, the availability of water in Parras not only made life possible in an arid environment but also helped consolidate one of the continent's oldest winemaking traditions. From the late 16th century, with the establishment of agricultural and wine-producing haciendas such as Hacienda de Arriba (1593) and Hacienda de San Lorenzo (1597), an activity developed that would, over time, become one of the region's defining characteristics. Beyond its economic dimension, wine production has been a key element in shaping local identity, articulating productive practices, technical knowledge, and forms of social organization linked to the efficient use of water. This work proposes an accessible approach to understanding how water, viticulture, landscape, and society intertwine in Parras, highlighting that its uniqueness lies not only in wine production but also in the historical development of a water culture. This culture has transformed an adverse environment into a productive, habitable, and symbolically significant space. In this sense, Parras can be understood as a representative example of how sustained interaction between nature and society gives rise to complex cultural landscapes, in which natural resources, traditional knowledge, and human activity converge to generate identity, continuity, and development under challenging environmental conditions.

Keywords: *Parras; viticulture; water; cultural landscape; oasis.*

INTRODUCCIÓN

Hablar del Valle de Parras de la Fuente es hablar de un territorio en el que el agua ha definido el curso de la historia. En medio de un entorno semidesértico, donde las condiciones naturales podrían parecer adversas al desarrollo humano, este valle se ha consolidado como un oasis productivo y cultural gracias a una relación profunda entre la sociedad y sus recursos naturales.

Desde sus primeros asentamientos, el aprovechamiento del agua ha sido un factor determinante. La presencia de manantiales, galerías filtrantes y sistemas tradicionales de conducción permitió no solo la subsistencia, sino también el desarrollo de actividades agrícolas especializadas. Entre ellas destaca la vitivinicultura, que, con el paso del tiempo, se convirtió en uno de los pilares económicos y culturales de la región. Diversos estudios históricos sitúan el origen de esta actividad a finales del siglo XVI, cuando comenzaron a consolidarse las primeras haciendas agrícolas y vitivinícolas del valle, lo que convirtió a Parras en uno de los antecedentes más tempranos de la producción de vino en el continente americano (Corona Páez, 2004, 2011).

La historia de Parras no puede entenderse sin considerar cómo sus habitantes aprendieron a gestionar el agua de manera eficiente, adaptándose a un entorno de escasez y transformándolo en una oportunidad. Este conocimiento, transmitido de generación en generación, ha dado lugar a prácticas que hoy forman parte del patrimonio cultural del valle. La disponibilidad de agua ha estado asociada a complejos procesos hidrogeológicos regionales vinculados a sistemas acuíferos que alimentan manantiales y corrientes subterráneas, lo que permite el desarrollo agrícola permanente en una región predominantemente árida (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2023).

En este contexto, el presente texto busca acercar al lector, de manera accesible, a la comprensión de Parras como un paisaje cultural en el que el agua, el trabajo humano y la tradición vitivinícola se integran en una misma narrativa (Mitchell et al., 2009). Más que ofrecer un análisis técnico, se propone una lectura que permita reconocer cómo estos elementos siguen presentes en la vida cotidiana y por qué resulta fundamental valorar y conservar estos sistemas ante los desafíos actuales relacionados con el uso sostenible del agua, la conservación del patrimonio y la permanencia de las actividades productivas tradicionales.

En años recientes, diversos estudios han señalado la importancia de conservar los paisajes culturales asociados al agua y a la agricultura tradicional en regiones áridas, debido a las presiones derivadas del cambio climático, la sobreexplotación de los recursos hídricos y las transformaciones productivas contemporáneas (UNESCO, 2011). En este contexto, el caso de Parras resulta particularmente relevante porque permite analizar cómo un sistema histórico

de aprovechamiento del agua ha contribuido al desarrollo económico, social y cultural de una comunidad durante más de cuatro siglos.

El objetivo de este trabajo es presentar una aproximación divulgativa a la relación histórica entre agua, vitivinicultura, paisaje y sociedad en el Valle de Parras, destacando cómo estos elementos han contribuido a la construcción de uno de los paisajes culturales más singulares del norte de México.

UN OASIS IMPROBABLE

En el sur del estado de Coahuila, rodeado por sierras, lomeríos y paisaje semidesértico, existe un territorio cuya historia parece desafiar la lógica geográfica. En una región donde predominan la escasez de lluvias, los matorrales xerófilos y los suelos áridos, el Valle de Parras surgió como una excepción: un oasis. De acuerdo con información de la Comisión Nacional del Agua, la región presenta precipitaciones medias anuales propias de los ambientes semiáridos del norte de México, generalmente inferiores a 350 mm anuales (CONAGUA, 2023).

Desde tiempos antiguos, este valle fue reconocido por la presencia de manantiales, ojos de agua y corrientes subterráneas que hicieron posible la vida humana, la agricultura y, con el paso de los siglos, una compleja cultura del agua. Mucho antes de las haciendas, las viñas o las bodegas, fue el agua la que hizo posible todo lo demás. Parras surgió como una condición natural extraordinaria en la que el agua, el territorio y la civilización quedaron profundamente vinculados entre sí. Esta relación entre la disponibilidad hídrica y la ocupación humana permite entender por qué los oasis han tenido, a lo largo de la historia, un significado que trasciende lo geográfico: son espacios donde la permanencia humana se vuelve posible (Lightfoot, 1996). En regiones áridas, el agua no solo sostiene los cultivos; también organiza sociedades, define asentamientos, ritmos productivos y relaciones comunitarias. En ese sentido, el Valle de Parras puede entenderse como un espacio en el que la geografía no fue un obstáculo, sino una oportunidad. En términos sencillos, sin agua constante, este valle no habría podido sostener ni población, ni agricultura, ni las actividades que hoy lo caracterizan.

La idea de oasis suele evocar fertilidad en medio de la escasez, pero, en términos históricos, implica algo más complejo: permanencia, adaptación y

capacidad de organización. La existencia de un oasis no depende únicamente de la presencia de agua, sino también de la forma en que una comunidad aprende a reconocerla, conducirla, protegerla y hacerla socialmente útil. En Parras, esa relación parece haber moldeado una continuidad histórica singular.

Este tipo de paisajes no es exclusivo de México. A lo largo del mundo, los oasis han sido puntos clave para el desarrollo de civilizaciones en entornos áridos, como en el norte de África o Medio Oriente. En todos los casos, el agua ha sido el factor determinante que ha permitido la permanencia humana y el desarrollo cultural. Parras puede entenderse dentro de esta lógica global, pero con características propias que la hacen única en el contexto mexicano. Entre ellas, destaca el temprano desarrollo de la vitivinicultura, documentado desde finales del siglo XVI, así como la permanencia de sistemas tradicionales de aprovechamiento del agua que continúan formando parte de la identidad regional (Corona Páez, 2004).

A ello se suma una notable dimensión ambiental. La coexistencia de semidesierto, áreas cultivadas y zonas arboladas, vinculadas a corrientes de agua, creó un mosaico ecológico que favoreció tanto el poblamiento como la producción. Esta condición no solo hizo habitable el valle, sino que también contribuyó a darle una identidad territorial distinta dentro del norte mexicano.

Como se observa en la figura 1, el Valle de Parras constituye una excepción dentro del paisaje semidesértico del sur de Coahuila, donde la presencia de agua ha permitido el establecimiento de áreas agrícolas permanentes y el desarrollo de una tradición productiva que perdura desde hace más de cuatro siglos.

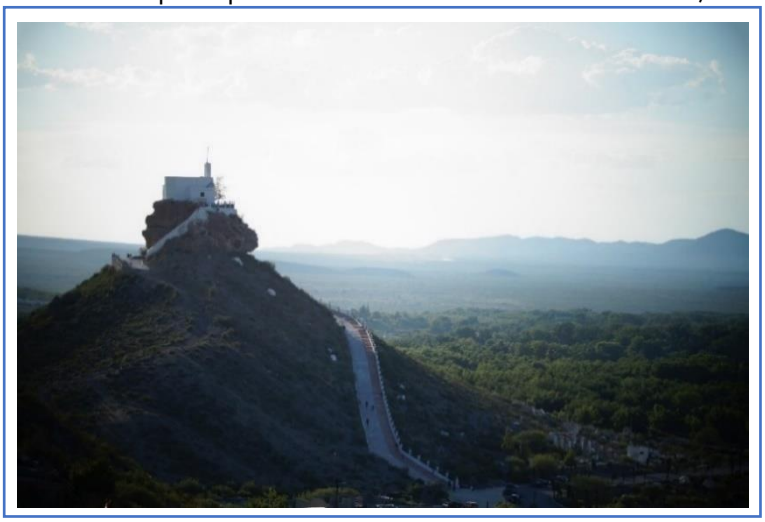


Figura 13. Vista del Valle de Parras desde su entorno semidesértico. Fotografía de Adolfo Perales Huerta.

EL VALLE DONDE EL AGUA CORRE BAJO LA TIERRA

Una de las particularidades del Valle de Parras es su condición hidrogeológica. Diversos procesos geológicos, ligados a antiguos fondos marinos, a la sedimentación y a formaciones impermeables del subsuelo, favorecieron la acumulación y la conducción natural de las aguas subterráneas. Durante siglos, estas aguas brotaban de manantiales y alimentaban sistemas de riego que permitieron la agricultura en medio del desierto (Hodge, 2002).

La disponibilidad de agua en el Valle de Parras se asocia con sistemas hidrogeológicos regionales que han favorecido la acumulación y la circulación de agua subterránea en una zona caracterizada por condiciones semiáridas. Entre ellos destaca el acuífero General Cepeda–La Sauceda, una unidad hidrogeológica que cubre aproximadamente 3,299 km² en el sur de Coahuila y constituye una de las principales reservas de agua subterránea de la región (CONAGUA, 2023). La presencia histórica de manantiales, norias y corrientes subterráneas que han dado origen al oasis de Parras está estrechamente vinculada a la dinámica de este sistema acuífero.

En una región donde la precipitación media anual suele ser inferior a 350 mm, el aprovechamiento eficiente del agua ha sido una condición indispensable para la permanencia de la población y el desarrollo agrícola. Diversos estudios recientes han señalado que los acuíferos del norte de México enfrentan crecientes presiones derivadas del aumento de la demanda de agua, las variaciones climáticas y la expansión de las actividades productivas, lo que ha puesto de manifiesto la importancia de fortalecer las estrategias de conservación y de manejo sostenible del recurso hídrico (CONAGUA, 2023; UNESCO, 2011).

Con el tiempo, la mano humana perfeccionó esa relación mediante acequias, canales, galerías filtrantes y sistemas tradicionales de captación que permitieron aprovechar de manera eficiente los manantiales y escurrimientos subterráneos del valle (Palerm, 2005). Esto hacía posible regar los cultivos de manera constante, incluso en temporadas de baja precipitación. La gestión del agua no fue un hecho espontáneo, sino el resultado de un conocimiento acumulado. Mantener el flujo, conducirlo, distribuirlo y hacerlo útil para los cultivos requirió técnica, trabajo comunitario y organización.

Las acequias no solo repartieron agua; también estructuraron relaciones sociales, acuerdos y formas de cooperación. En torno al agua se construyó una cultura. Reconocer pendientes, identificar surgencias, conducir escurrimientos y conservar la humedad en los suelos implicó una relación muy estrecha con el entorno. Actualmente, este tipo de infraestructuras es reconocido no solo por su función práctica, sino también por su valor como patrimonio hidráulico, al representar formas históricas de adaptación humana a ambientes áridos y constituir testimonios materiales del conocimiento acumulado por las comunidades para gestionar el recurso hídrico a lo largo del tiempo (Fuerte Velázquez, 2019; UNESCO, 2011).

Como puede observarse en la figura 2, las galerías filtrantes, o fuques, constituyen una de las expresiones más representativas del patrimonio hidráulico de Parras. Estos sistemas, semejantes a las galerías filtrantes documentadas en otras regiones áridas del mundo, permitían interceptar flujos subterráneos y conducir el agua por gravedad hacia áreas agrícolas y asentamientos humanos, reduciendo las pérdidas por evaporación y asegurando un suministro relativamente constante (Lightfoot, 1996).

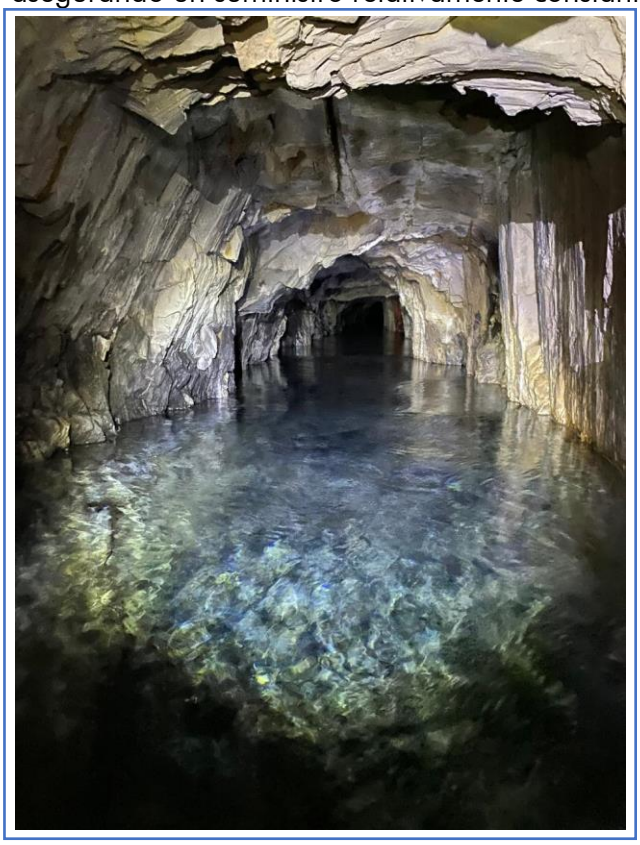


Figura 2. Interior de una galería filtrante (fuque), expresión histórica del aprovechamiento subterráneo del agua en el Valle de Parras. Fotografía de Adolfo Perales Huerta.

En muchos paisajes históricos, los sistemas hidráulicos revelan tanto como los edificios monumentales. Permiten comprender las prioridades económicas, las formas de organización social y las estrategias de adaptación al entorno. En Parras, los trazos del agua forman parte de esa lectura territorial. No se trata solo de infraestructura funcional, sino de huellas materiales que muestran cómo distintas generaciones aprendieron a convivir con un recurso limitado y a construir un sistema productivo duradero.

La disponibilidad y la distribución del agua influyeron directamente en la localización de cultivos, asentamientos y actividades productivas, lo que contribuyó a la organización histórica del territorio. En esa medida, la historia del agua es también la historia de la construcción del paisaje cultural que distingue a Parras entre los oasis históricos del norte de México.

DONDE LA VID ENCONTRÓ SU DESTINO

Cuando los españoles llegaron al norte novohispano, encontraron en este oasis condiciones singulares para el cultivo: suelos apropiados, disponibilidad de agua, un clima extremo pero favorable y un valle protegido. Estas condiciones permitieron el establecimiento de algunas de las primeras explotaciones vitivinícolas documentadas en América y favorecieron la consolidación de haciendas agrícolas que desempeñaron un papel fundamental en la organización económica y territorial de la región (Chevalier, 1976). Entre ellas destaca la Hacienda de Arriba, fundada por Francisco de Urdiñola hacia 1593, así como la Hacienda de San Lorenzo, establecida pocos años después y reconocida actualmente como el origen de Casa Madero, considerada una de las bodegas en operación continua más antiguas del continente (Corona Páez, 2004, 2011).

La introducción de la vid no fue solo un acontecimiento agrícola. Supuso la incorporación de conocimientos sobre cultivo, prácticas de riego, técnicas de transformación y formas de organización productiva que encontraron en Parras condiciones favorables para su desarrollo. A partir de entonces, la producción de vino comenzó a integrarse gradualmente en la vida económica y social del territorio, convirtiéndose en una actividad estrechamente vinculada al aprovechamiento del agua y a la adaptación de las comunidades a un entorno semiárido.

La viticultura requería tiempo, observación y paciencia. Cada ciclo de poda, brotación, maduración y cosecha recuerda que el vino surge de procesos largos. Esa temporalidad también fue modelando una cultura. La vid transformó la relación de los habitantes con el paisaje, introduciendo nuevas formas de observar las estaciones, interpretar el clima, reconocer los suelos y ajustar las prácticas agrícolas. La viticultura no solo se adaptó al territorio; también contribuyó a redefinirlo.

Con el paso de los siglos, la producción vinícola dejó de ser únicamente una actividad económica y adquirió un valor simbólico e identitario. En muchos sentidos, el vino comenzó a expresar una relación histórica entre la naturaleza, el trabajo y la cultura. Actualmente, la vitivinicultura continúa siendo una de las actividades más representativas de Parras y de Coahuila, estado que se mantiene entre los principales productores de uva para vinificación en México y concentra algunas de las bodegas más reconocidas del país (Consejo Mexicano Vitivinícola, 2024; Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2024).

La permanencia de esta actividad no estuvo exenta de dificultades. Durante el siglo XIX y principios del XX, la vitivinicultura regional enfrentó diversos desafíos asociados a crisis económicas, transformaciones productivas y problemas fitosanitarios, como la filoxera, que afectó importantes zonas vitivinícolas y obligó a replantear las estrategias de cultivo y producción en el valle (Corona Páez, 2009). A pesar de estas circunstancias, la actividad logró mantenerse y evolucionar, consolidándose como uno de los elementos más representativos de la identidad regional.

Más allá de las cifras productivas, la permanencia de la vid en el valle durante más de cuatro siglos refleja la capacidad de adaptación de una comunidad que aprendió a aprovechar de manera eficiente los recursos disponibles. La historia del vino en Parras no puede separarse de la del agua, del trabajo agrícola y de la construcción de un paisaje cultural que sigue evolucionando hasta nuestros días.

EL VINO COMO TEJIDO SOCIAL

Hablar del vino en Parras de la Fuente es hablar de vendimias, celebraciones, memoria familiar, hospitalidad, gastronomía, paisaje y comunidad. Durante generaciones, el vino ha estado presente tanto en rituales sociales como en la vida cotidiana: en conversaciones, sobremesas y relatos que se transmiten de una generación a otra. Esta presencia histórica ha contribuido a consolidar una identidad regional estrechamente vinculada a la cultura vitivinícola, reconocida actualmente como uno de los principales elementos distintivos del municipio (Corona Páez, 2011).

Las vendimias han sido una expresión de trabajo colectivo. En torno a la cosecha se reunían manos, conocimientos y esfuerzos compartidos. El traslado de la uva, el trabajo en lagares, los antiguos carretones de bueyes, los oficios asociados a las bodegas y la celebración posterior forman parte de una memoria social profundamente ligada al vino. En años recientes, las vendimias también se han consolidado como eventos culturales y turísticos que atraen visitantes nacionales e internacionales, lo que fortalece la difusión del patrimonio vitivinícola regional (Consejo Mexicano Vitivinícola, 2024).

Como se observa en la figura 3, algunas prácticas asociadas a la vendimia han trascendido su función productiva para convertirse en expresiones simbólicas que refuerzan el sentido de pertenencia y la continuidad de las tradiciones locales.

Además de su dimensión productiva, el vino ha cobrado un gran valor simbólico. Se asocia con la celebración, la abundancia, la hospitalidad y el encuentro. En muchos territorios vitivinícolas, el vino condensa una narrativa sobre el lugar de donde proviene; en Parras, el vino también habla del valle, de su historia y de su gente.



Figura 3. Pisado de uva en lagar, como práctica simbólica que articula trabajo, celebración y memoria en la cultura vitivinícola de Parras. Fotografía de Adolfo Perales Huerta.

Puede entenderse, además, como un mediador cultural. En torno a una mesa, durante una cata o una vendimia, se comparten relatos, se transmiten recuerdos y se fortalecen vínculos. Esta dimensión relacional, aunque menos visible que la producción, resulta fundamental para comprender la permanencia de una cultura del vino a lo largo del tiempo. Diversos estudios sobre enoturismo y patrimonio cultural han señalado que las experiencias vinculadas al vino permiten conectar la producción, el territorio y la identidad, favoreciendo procesos de valoración social del paisaje y de las tradiciones locales (UNESCO, 2011).

Sin embargo, el vino no existe de manera aislada. Forma parte de un sistema productivo más amplio, posible gracias a la disponibilidad de agua en el valle. Junto a los viñedos, se han desarrollado otros cultivos tradicionales como el nogal —base de la producción de nuez pecana—, así como frutales como higueras, duraznos y granadas, que enriquecen tanto el paisaje como la dieta local. Actualmente, Parras forma parte de una de las regiones nogaleras más importantes del norte de México, actividad que comparte con la vitivinicultura una estrecha dependencia de los sistemas históricos de aprovechamiento del agua.

De igual forma, la ganadería ha desempeñado un papel importante, especialmente en la producción de leche y de derivados, como los dulces tradicionales de leche, que forman parte de la identidad gastronómica de la región. Estas actividades, junto con la agricultura y la vitivinicultura, configuran un entramado económico y cultural en el que el agua es el elemento articulador.

En este sentido, la gastronomía regional refleja esta integración. El vino se acompaña de productos locales, sabores del campo y prácticas culinarias que han evolucionado en conjunto, dando lugar a una experiencia que va más allá del consumo: una expresión viva del territorio. En la actualidad, esta interacción entre vino, gastronomía y paisaje constituye uno de los principales atractivos culturales y turísticos de Parras, contribuyendo a la preservación y difusión de su patrimonio biocultural (Consejo Mexicano Vitivinícola, 2024).

UN PAISAJE CONSTRUIDO POR EL TRABAJO HUMANO

El paisaje de Parras no es solo natural. Es un paisaje cultural conformado por viñedos, nogaleras, acequias, bodegas, casonas, haciendas y antiguos caminos, resultado de siglos de intervención humana (García Martínez, 1992). Ese paisaje contiene capas históricas en las que conviven trazas coloniales, infraestructura agrícola, patrimonio edificado, vestigios industriales y elementos rurales que aún forman parte de la vida cotidiana. No es un paisaje inmóvil, sino construido y transformado constantemente.

Diversos organismos internacionales y estudios especializados han señalado que los paisajes culturales representan la interacción prolongada entre las comunidades humanas y su entorno natural, constituyendo expresiones materiales e inmateriales de la historia de un territorio (ICOMOS, 2017; Rössler, 2006; UNESCO, 2011). En el caso de Parras, esta interacción puede observarse en la permanencia de sistemas hidráulicos tradicionales, de áreas agrícolas históricas, de edificaciones vinculadas a la producción vitivinícola y de espacios que conservan funciones productivas y sociales desde hace varias generaciones.

El paisaje cultural no se limita a los elementos visibles del territorio. También refleja procesos históricos, formas de organización social y estrategias de adaptación desarrolladas a lo largo del tiempo. Una acequia antigua, un muro de adobe, una bodega histórica o una noria constituyen testimonios materiales que permiten comprender distintas etapas del desarrollo agrícola y económico del valle. Los caminos antiguos remiten a redes de intercambio y comunicación; las bodegas, a procesos productivos; las haciendas, a formas de organización territorial; y las antiguas instalaciones industriales, a transformaciones tecnológicas ocurridas en distintos periodos históricos.

Esta diversidad de elementos permite reconocer al paisaje como una fuente de información sobre la evolución del territorio. Diversos estudios sobre patrimonio cultural han destacado que la conservación de estos espacios contribuye a fortalecer la identidad local, a favorecer la apropiación social del patrimonio y a mantener la memoria colectiva asociada a los procesos históricos de ocupación y transformación del entorno (UNESCO, 2011).

Bajo esta perspectiva, el paisaje de Parras no constituye únicamente el escenario donde se desarrolla la actividad vitivinícola, sino también una parte fundamental de su historia. La disposición de los cultivos, la localización de las acequias, la arquitectura de las haciendas y la permanencia de antiguos espacios productivos muestran cómo el agua, la agricultura, el trabajo y la sociedad han contribuido conjuntamente a la construcción de uno de los paisajes culturales más representativos del norte de México.

OFICIOS QUE SOSTIENEN UNA TRADICIÓN

Detrás de una botella hay múltiples oficios que sostienen esta tradición. Desde quien poda la vid, conduce el riego y cosecha, hasta quien cuida la fermentación, limpia barricas, diseña etiquetas, sirve una copa o interpreta la historia del territorio, todos forman parte de una cadena cultural. La producción vitivinícola no depende únicamente de la vid o de la tecnología empleada en las bodegas; también descansa en conocimientos prácticos acumulados durante generaciones y adaptados a las condiciones específicas del valle (Corona Páez, 2011).

Como se observa en la figura 4, la cultura del vino abarca una diversidad de actividades especializadas que van desde el trabajo agrícola hasta la elaboración, comercialización y difusión del producto. Cada una de estas tareas requiere habilidades específicas y contribuye a la continuidad de una tradición que forma parte de la identidad regional.



Figura 4. Oficios vinculados a la cultura vinícola, donde trabajo, técnica y saberes prácticos convergen en patrimonio vivo. Fotografía de Adolfo Perales Huerta

Muchos de esos saberes son discretos y, a veces, pasan desapercibidos, pero son precisamente esos conocimientos cotidianos los que sostienen una tradición viva. Reconocer esos oficios es reconocer patrimonio humano. La continuidad de una tradición rara vez depende solo de grandes instituciones; muchas veces descansa en habilidades concretas transmitidas entre generaciones y comunidades. Desde esta perspectiva, el patrimonio no se limita a edificios, objetos o paisajes, sino que también incluye conocimientos, prácticas y formas de interpretar el territorio que las personas mantienen y recrean en su vida cotidiana (Smith, 2006; UNESCO, 2011). Técnicas de campo, decisiones de bodega, manejo empírico y observación práctica constituyen formas de conocimiento que han permitido adaptar la producción vitivinícola a las condiciones ambientales y sociales del territorio.

Diversos organismos internacionales han destacado la importancia de los conocimientos tradicionales y de los oficios especializados como parte del patrimonio cultural inmaterial de las comunidades, ya que constituyen prácticas vivas que fortalecen la identidad, la cohesión social y la transmisión de conocimientos entre generaciones (UNESCO, 2011). En este sentido, los oficios asociados al vino forman parte de un patrimonio que trasciende los objetos materiales y se expresa en habilidades, experiencias y formas de trabajo compartidas.

En muchos casos, estos oficios se aprenden en la práctica y se transmiten en las familias o comunidades, lo que refuerza su valor como patrimonio cultural vivo. Gracias a esta transmisión intergeneracional, numerosos conocimientos relacionados con el cultivo de la vid, el manejo del agua, la elaboración del vino y la atención de visitantes continúan vigentes y siguen contribuyendo a la preservación de la cultura vitivinícola de Parras.

PATRIMONIO, TERRITORIO Y FUTURO

El concepto de patrimonio permite ampliar esta lectura. Actualmente se reconoce la existencia de un patrimonio agrícola, hidráulico, industrial, gastronómico e inmaterial, vinculado a prácticas, saberes y memorias colectivas que contribuyen a la construcción de la identidad de los territorios (UNESCO, 2011). Desde esa perspectiva, Parras reúne múltiples dimensiones

patrimoniales que dialogan entre sí y reflejan más de cuatro siglos de interacción entre el agua, la agricultura, la vitivinicultura y la sociedad.

En décadas recientes, la tradición vitivinícola histórica se ha articulado con nuevas bodegas, proyectos artesanales y una creciente vocación enoturística. Este proceso ha ampliado la relación entre el vino y la sociedad, generando experiencias culturales, actividades recreativas y nuevas oportunidades económicas vinculadas al patrimonio regional. De acuerdo con el Consejo Mexicano Vitivinícola (2024), el enoturismo se ha consolidado como una de las actividades de mayor crecimiento en las regiones productoras de vino de México, lo que favorece la diversificación económica y la valorización de los paisajes vitivinícolas. Diversos estudios han señalado, además, que las experiencias enoturísticas contemporáneas tienden a integrar elementos de tradición, hospitalidad, identidad territorial e innovación, lo que fortalece la conexión entre visitantes, patrimonio y cultura local (Alonso et al., 2022). En el caso particular de Parras, la condición de Pueblo Mágico y el desarrollo de actividades vinculadas al vino han contribuido a posicionar al municipio como uno de los principales destinos de enoturismo del norte de México (Lara et al., 2022).

Como puede observarse en la figura 5, recorrer viñedos, visitar bodegas, participar en catas o caminar por paisajes vinculados al vino puede convertirse en una experiencia que conecta la producción, la memoria y la identidad. Estas actividades acercan a los visitantes a la historia del territorio y favorecen una mayor valoración de los recursos naturales y culturales que han dado forma al oasis de Parras.



Figura 5. Enoturismo en el paisaje vitivinícola: expresión contemporánea de la relación entre vino, cultura y territorio.
Fotografía de archivo NODO.

En este proceso también se han revalorado elementos que durante mucho tiempo se consideraron secundarios, como los antiguos sistemas hidráulicos, las ruinas industriales, los caminos rurales, la gastronomía local y la memoria oral.

Diversos estudios sobre patrimonio cultural han señalado que la conservación de estos elementos contribuye a fortalecer el sentido de pertenencia y la apropiación social del territorio (UNESCO, 2011).

El enoturismo, entendido desde una perspectiva integral, puede ser más que una actividad recreativa o de consumo. Puede convertirse en una herramienta para interpretar el territorio, fortalecer la difusión del patrimonio y generar nuevas formas de valorar el paisaje cultural. En regiones históricas como Parras, esta actividad permite vincular la producción, la conservación y el desarrollo local.

Al mismo tiempo, este proceso plantea desafíos importantes. El agua, base histórica de este oasis, enfrenta presiones derivadas del cambio climático, de la sobreexplotación y de los cambios en los sistemas productivos. En regiones semidesérticas, estos cambios pueden tener efectos más intensos, afectando tanto la disponibilidad como la calidad del agua y aumentando la vulnerabilidad de los sistemas productivos que dependen de este recurso (CONAGUA, 2023; IPCC, 2023).

En regiones semidesérticas, estos cambios pueden afectar tanto la disponibilidad como la calidad del agua, influyendo directamente en las actividades agrícolas, ganaderas y vitivinícolas que han caracterizado históricamente al valle. Esto obliga a replantear las formas en que se produce, se habita y se gestiona el territorio.

Pensar el futuro de Parras implica preguntarse cómo conservar las relaciones entre el agua, el paisaje, la memoria, el trabajo y la cultura. No basta con preservar edificios históricos ni con promover únicamente el turismo; el reto consiste en mantener los procesos sociales, ambientales y productivos que han permitido la continuidad de este paisaje cultural durante más de cuatro siglos.

En este contexto, la sostenibilidad y el patrimonio dejan de ser conceptos separados. La conservación del agua contribuye a la preservación del paisaje; la conservación del paisaje favorece la continuidad de las actividades productivas y culturales; y la permanencia de estas actividades fortalece la identidad territorial. Bajo esta perspectiva, el patrimonio no se limita a los elementos materiales del pasado, sino que constituye una realidad dinámica que continúa transformándose junto con la comunidad que le da sentido.

Reducir Parras únicamente a la producción de vino sería simplificar una historia mucho más compleja. Parras también es agua, agricultura,

patrimonio hidráulico, paisaje, memoria y adaptación ambiental. Su principal valor radica en mostrar cómo una comunidad logró transformar las condiciones de un entorno árido en una experiencia histórica de ocupación, producción y construcción cultural que perdura hasta nuestros días.

CONCLUSIONES

El Valle de Parras de la Fuente es un claro ejemplo de cómo la interacción entre la naturaleza y la sociedad puede dar lugar a paisajes culturales complejos y duraderos. A lo largo de este recorrido se ha mostrado que la disponibilidad de agua, asociada a sistemas hidrogeológicos regionales que han permitido la existencia de manantiales y áreas agrícolas permanentes, ha sido un elemento fundamental para el establecimiento humano, el desarrollo productivo y la construcción cultural de este oasis del norte de México.

La vitivinicultura, lejos de ser una actividad aislada, forma parte de un sistema territorial más amplio en el que la agricultura, la ganadería, la gastronomía, el patrimonio hidráulico y los saberes tradicionales convergen. En este contexto, el vino puede entenderse como una expresión cultural que sintetiza más de cuatro siglos de adaptación ambiental, conocimiento técnico y trabajo colectivo.

Asimismo, el reconocimiento del paisaje de Parras como una construcción histórica permite valorar no solo sus elementos materiales, como acequias, haciendas, viñedos y bodegas, sino también los conocimientos, oficios y prácticas culturales que han contribuido a su permanencia a lo largo del tiempo. Esta perspectiva resulta especialmente relevante ante los desafíos actuales de la conservación del patrimonio y la gestión sostenible de los recursos hídricos.

Más que un territorio del pasado, Parras constituye un paisaje cultural vivo que continúa transformándose. Su estudio permite comprender cómo el aprovechamiento del agua, la producción agrícola y la tradición vitivinícola han contribuido a la formación de una identidad regional singular, al tiempo que plantea la necesidad de fortalecer estrategias que aseguren la conservación de este patrimonio biocultural para las generaciones futuras (Toledo & Barrera-Bassols, 2008).

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a las comunidades, productores vitivinícolas, agricultores y custodios del patrimonio histórico de Parras de la Fuente, cuya experiencia y compromiso con el territorio han permitido preservar la riqueza cultural, hidráulica y productiva del valle.

REFERENCIAS

Alonso, A. D., Bressan, A., Vu Thi Kim, O., Kok, S. K., & Atay, E. (2022). Integrating tradition and innovation within a wine tourism and hospitality experience. *International Journal of Tourism Research, 25*(1), 169–182. https://doi.org/10.1002/jtr.2561

Chevalier, F. (1976). *La formación de los grandes latifundios en México*. Fondo de Cultura Económica.

Comisión Nacional del Agua. (2023). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero General Cepeda–La Sauceda (0505), Estado de Coahuila*. https://sigagis.conagua.gob.mx

Consejo Mexicano Vitivinícola. (2024). *Informe anual de la industria vitivinícola mexicana 2024*. https://uvayvino.org.mx

Corona Páez, S. (2004). *La vitivinicultura en Parras y La Laguna*. Universidad Iberoamericana Laguna.

Corona Páez, S. A. (2009). El Valle de Parras y el desastre de la filoxera, 1870–1910: Génesis y consolidación de una empresa vitivinícola en tiempos de crisis. *Mundo Agrario, 9*(18), 1–25.

Corona Páez, S. (2011). *El país de la Laguna: Impacto hispano-tlaxcalteca en la forja de la Comarca Lagunera*. Universidad Iberoamericana Laguna.

Fuerte Velázquez, D. J. (2019). Sustentabilidad y la gestión del recurso agua en México: Una revisión histórica. *Economía y Sociedad, 23*(40), 13–27.

García Martínez, B. (1992). *El desarrollo regional en México*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Económicas.

Hodge, A. T. (2002). *Roman aqueducts & water supply*. Duckworth.

ICOMOS. (2017). *Principles concerning rural landscapes as heritage*. International Council on Monuments and Sites. https://www.icomos.org

IPCC. (2023). Climate change 2023: Synthesis report. In H. Lee & J. Romero (Eds.), *Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 35–115). Intergovernmental Panel on Climate Change. https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

Lara, C. B., Pérez, B. E. M., & Torres, L. H. S. (2022). Parras, Coahuila pueblo mágico y enoturismo. *Journal of Tourism and Heritage Research, 5*(3), 176–192.

Lightfoot, D. R. (1996). Syrian qanat Romani: History, ecology, abandonment. *Journal of Arid Environments, 33*(3), 321–336. https://doi.org/10.1006/jare.1996.0068

Mitchell, N., Rössler, M., & Tricaud, P. M. (2009). *World Heritage cultural landscapes: A handbook for conservation and management (World Heritage Papers No. 26)*. UNESCO World Heritage Centre.

Palerm, J. (2005). *Aportaciones para el estudio de la obra hidráulica del pequeño riego, Parras de la Fuente, Coahuila, México* [Tesis de maestría, Colegio de Postgraduados]. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1921.6242

Rössler, M. (2006). World Heritage cultural landscapes: A UNESCO flagship programme. *Landscape Research, 31*(4), 333–353.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2024). *Anuario estadístico de la producción agrícola 2024*. https://www.gob.mx/siap

Smith, L. (2006). *Uses of heritage*. Routledge.

Toledo, V. M., & Barrera-Bassols, N. (2008). *La memoria biocultural: La importancia ecológica de las sabidurías tradicionales* (Vol. 3). Icaria Editorial.

UNESCO. (2011). Recommendation on the historic urban landscape. In F. Bandarin & R. van Oers (Eds.), *The historic urban landscape: Managing heritage in an urban century* (pp. 209–216). Wiley-Blackwell.

DE LA BIOMASA AL BIOCARBÓN: MATERIALES SOSTENIBLES PARA SU INCORPORACIÓN EN ELASTÓMEROS

FROM BIOMASS TO BIOCARBON: SUSTAINABLE MATERIALS FOR INCORPORATION INTO ELASTOMERS

PUENTE MEDELLÍN, Miguel Angel [1]

CASTAÑEDA FACIO, Adalí Oliva [1]

SÁENZ GALINDO, Aidé [1]

DÍAZ ELIZONDO, José Alejandro [2]

DÍAZ DE LEÓN GÓMEZ, Ramón Enrique [2]

RESUMEN

El uso de materiales sustentables se ha convertido en una prioridad frente a la creciente demanda de alternativas a los derivados del petróleo. En este contexto, el biocarbón, obtenido a partir de la pirólisis de biomasa, surge como un material versátil cuyas propiedades estructurales, térmicas y químicas lo hacen sumamente beneficioso como carga o refuerzo en prácticamente cualquier tipo de matriz polimérica. No obstante, su aplicación cobra un especial realce en los sistemas elastoméricos, donde su capacidad de refuerzo permite optimizar el desempeño de compuestos elásticos de manera sostenible. Este trabajo presenta el potencial del biocarbón como refuerzo alternativo y ecológico, destacando su capacidad para contribuir en el desempeño mecánico y la estabilidad de los elastómeros, al tiempo que reduce la huella ambiental mediante el aprovechamiento de residuos orgánicos. Además, se aborda el concepto de refuerzo dual, en el cual el biocarbón actúa en sinergia con nanopartículas metálicas para conferir propiedades adicionales como conductividad y resistencia al desgaste. Finalmente, se discuten los retos y perspectivas futuras en torno a su escalamiento industrial, la optimización de sus propiedades y su papel dentro de las tendencias globales hacia una economía circular y materiales sostenibles. En conjunto, el biocarbón se perfila como un componente clave en el desarrollo de la nueva generación de elastómeros más eficientes y comprometidos con el medio ambiente.

Palabras clave: *biocarbón; elastómeros sostenibles; doble refuerzo; nanopartículas metálicas; economía circular.*

1. Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila. Saltillo, Coahuila, México.

2. Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA). Saltillo, Coahuila, México.

Correspondencia
adali.castaneda@uadec.edu.mx
https://orcid.org/0000-0003-3780-112X

Fecha de recepción
1 de diciembre de 2025.
Fecha de aceptación
14 de mayo de 2026.

ABSTRACT

The use of sustainable materials has become a priority in the face of the growing demand for alternatives to petroleum-based products. In this context, biochar, obtained from the pyrolysis of biomass, emerges as a versatile material whose structural, thermal, and chemical properties make it highly beneficial as a filler or reinforcement in virtually any type of polymer matrix. However, its application is particularly noteworthy in elastomeric systems, where its reinforcing capacity allows for the sustainable optimization of elastic composite performance. This work presents the potential of biochar as an alternative and environmentally friendly reinforcement, highlighting its ability to contribute to the mechanical performance and stability of elastomers, while reducing the environmental footprint by utilizing organic waste. Furthermore, the concept of dual reinforcement is addressed, in which biochar acts synergistically with metallic nanoparticles to confer additional properties such as conductivity and wear resistance. Finally, the challenges and future prospects surrounding its industrial scaling, the optimization of its properties, and its role within global trends toward a circular economy and sustainable materials are discussed. Overall, biochar is emerging as a key component in the development of a new generation of more efficient and environmentally friendly elastomers.

Keywords: *biochar, sustainable elastomers, dual reinforcement, metallic nanoparticles, circular economy.*

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los compuestos elastoméricos como el caucho son ampliamente utilizados en la fabricación de neumáticos y otros productos industriales debido a su resistencia a la fricción y la fatiga (Di Bernardo et al., 2025). Existen diversos tipos de caucho, como por ejemplo el natural, neopreno, estireno-butadieno (SBR), nitrilo butadieno y silicona, cada uno con propiedades específicas para distintas aplicaciones (Karunanayake et al., 2025). Sin embargo, la mayoría de estos materiales derivan de hidrocarburos, cuya producción genera entre 1.5 y 3 kg de CO_2 por cada kg de caucho fabricado. En México, los residuos de neumáticos representan una fuente importante de microplásticos urbanos (Secretaría de Medio Ambiente y

Recursos Naturales [SEMARNAT], 2023), y su reciclaje es mínimo. En 2025 solo el 3 % de los residuos plásticos fueron recuperados (SEMARNAT, 2023).

Ante este panorama, resulta necesario explorar alternativas sostenibles como la biomasa y el biocarbón. La biomasa, materia orgánica de origen vegetal o animal, constituye un sistema natural de almacenamiento de energía solar reciente (González Velasco, 2023). El biocarbón, obtenido mediante la pirólisis de biomasa en ausencia de oxígeno, es un material carbonoso altamente poroso y químicamente estable, caracterizado por una elevada área superficial y una estructura rica en sitios funcionales. Estas propiedades le confieren la capacidad de mejorar la calidad de los suelos al incrementar la retención de nutrientes y agua, así como de favorecer la actividad microbiana. Asimismo, debido a su alta estabilidad química, el biocarbón permite la incorporación y retención de carbono de origen biogénico durante largos periodos de tiempo, contribuyendo a la reducción de emisiones asociadas al ciclo del carbono y posicionándose como un material de interés en estrategias de mitigación del cambio climático. Este proceso termoquímico ocurre entre 300 y 700 °C (Escalante Rebolledo et al., 2016).

Investigaciones recientes destacan el potencial del biocarbón como refuerzo en elastómeros, en sustitución de aditivos derivados del petróleo como el negro de humo (Lubura et al., 2022). Dependiendo de sus condiciones de producción y tratamiento, el biocarbón puede mejorar la resistencia, rigidez y durabilidad de cauchos naturales y sintéticos (Bélanger et al., 2023). Con ello, se impulsa la economía circular al reducir la dependencia de recursos fósiles y promover materiales sostenibles.

El objetivo de este trabajo es mostrar que el biocarbón, obtenido a partir de biomasa, puede convertirse en un material alternativo y sostenible para el refuerzo de elastómeros, propiciando el desarrollo de una nueva generación de compuestos más eficientes y respetuosos con el medio ambiente.

EL BIOCARBÓN

También conocido como biochar, es un material carbonoso sólido obtenido mediante la pirólisis de biomasa, es decir, la descomposición térmica de materia orgánica en ausencia de oxígeno o con muy poca presencia de él (Escalante Rebolledo et al., 2016). Su estructura porosa, alta estabilidad

química y capacidad de adsorción lo convierten en un recurso valioso para aplicaciones agrícolas, ambientales y energéticas (Teixeira De Lima et al., 2025). El biocarbón se caracteriza por ser una forma recalcitrante de carbono, lo que significa que puede permanecer en el suelo durante décadas o siglos sin degradarse, contribuyendo al secuestro de carbono y a la mitigación del cambio climático. Sus propiedades fisicoquímicas como la porosidad, el área superficial específica, el pH alcalino y la presencia de grupos funcionales dependen del tipo de biomasa utilizada y de las condiciones del proceso de pirólisis (temperatura, tiempo, atmósfera, etcétera) (Lehmann, 2007).

OBTENCIÓN DEL BIOCARBÓN

Todo inicia con la biomasa, la cual se define como materia orgánica de origen vegetal o animal que puede ser utilizada como fuente de energía. Esta incluye residuos agrícolas, forestales, industriales, urbanos y cultivos energéticos (Bustamante García et al., 2017). Desde una perspectiva biofísica, la biomasa representa una forma de energía solar almacenada mediante procesos fotosintéticos, en contraste con los combustibles fósiles que son biomasa transformada durante millones de años (González Velasco, 2023). A través de la fotosíntesis, las plantas convierten dióxido de carbono y agua en compuestos orgánicos ricos en energía, como carbohidratos, lípidos y proteínas, que constituyen la base de la biomasa utilizable. Aunado a su valor energético, la biomasa tiene un papel relevante en la transición hacia una economía circular, al permitir el reciclaje de residuos orgánicos y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Si bien la biomasa es una fuente de carbono renovable, esta debe de ser procesada para obtener las propiedades que se requieren para su aplicación. Para ello se hace uso de la técnica más prometedora para dicha transformación, la cual es la "pirólisis". Este es un proceso termoquímico mediante el cual la materia orgánica se descompone en ausencia de oxígeno o con cantidades mínimas de este, generando productos sólidos (como carbón o biocarbón), líquidos (bioaceites) y gaseosos (gases combustibles) como se observa en la figura 1. Este proceso ocurre típicamente a temperaturas entre 300 y 700 °C, y su eficiencia depende del tipo de biomasa, la temperatura, el tiempo de residencia y la atmósfera del reactor (Bridgwater, 2012).

El biocarbón representa una alternativa ambientalmente responsable frente a los rellenos de origen fósil, como el negro de humo. Su producción se enmarca en los principios de la economía circular al valorizar residuos orgánicos renovables, contribuyendo en gran medida a las estrategias de mitigación del cambio climático al favorecer la incorporación y estabilización de carbono biogénico dentro de las matrices poliméricas de larga vida útil. Además, su perfil de pureza con menor presencia de metales pesados y compuestos tóxicos lo hace especialmente adecuado para aplicaciones sensibles, reforzando su competitividad en sectores regulados y sostenibles.

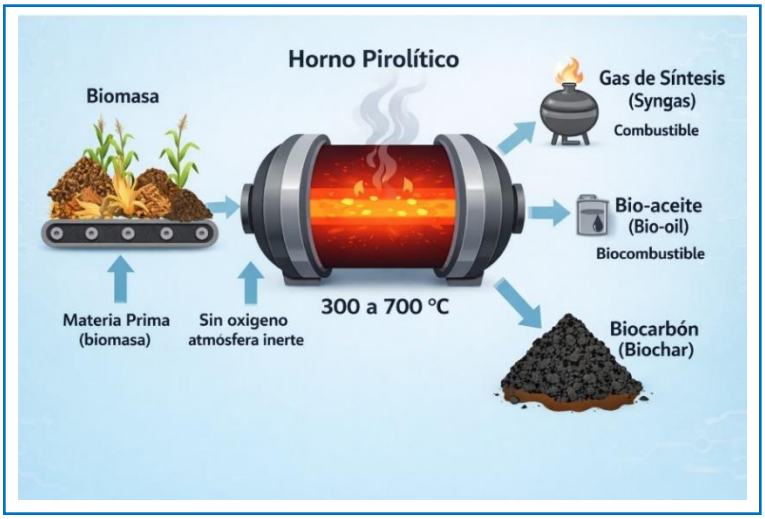


Figura 14.
Obtención de biocarbón vía pirólisis.

DE LA BIOMASA AL BIOCARBÓN: LA CIENCIA DETRÁS DEL PROCESO

Como se mencionó previamente, mediante la pirólisis de residuos orgánicos, es posible obtener un material carbonoso denominado biocarbón, el cual se produce al calentar la biomasa sin presencia de oxígeno. Durante este proceso la materia prima (biomasa) se descompone en tres fracciones principales: gas, líquido (bioaceite) y un sólido con un alto contenido de carbono el cual es denominado biocarbón. La proporción de cada fracción depende de variables como el tipo de biomasa, la temperatura de pirólisis y la velocidad de calentamiento (Bélanger et al., 2023).

Una de las características más relevantes del biocarbón es su alta superficie específica, que puede alcanzar valores superiores a 300 m^2/g, lo que favorece

la interacción con matrices poliméricas o con contaminantes en aplicaciones ambientales (Ahmad et al., 2014).

La superficie se relaciona con la porosidad interna. Esto convierte al biocarbón en una especie de "esponja de carbón" que cuenta con capacidad de adsorción. De igual forma, la estabilidad química del material es alta, debido a la formación de estructuras químicas aromáticas que se condensan durante la pirólisis, lo que le confiere resistencia a la degradación (Spokas, 2010).

Si comparamos a los materiales que se derivan del petróleo, por ejemplo, el negro de humo, el biocarbón representa una alternativa más sostenible. Mientras que el negro de humo ofrece un refuerzo mecánico probado en elastómeros, se produce mediante procesos intensivos en energía y es altamente contaminante (Kang et al., 2016), el biocarbón aprovecha residuos agrícolas y forestales, reduciendo la huella de carbono y aportando beneficios de circularidad en el uso de recursos (Guo et al., 2015). Estudios recientes han demostrado que el biocarbón puede funcionar como relleno alternativo o complementario en mezclas de caucho, mejorando propiedades físicas y mecánicas cuando se combina con nanopartículas inorgánicas, particularmente óxidos metálicos, que actúan como rellenos funcionales dentro de la matriz elastomérica (Sik Ok et al., 2015).

En este sentido, el biocarbón no solo destaca por su origen renovable, sino también por la posibilidad de ajustar sus propiedades mediante la selección de la biomasa de partida y las condiciones de pirólisis, lo que abre un amplio espectro de aplicaciones en la ciencia de materiales.

BIOCARBÓN COMO REFUERZO DE ELASTÓMEROS

Los elastómeros son polímeros con alta elasticidad, capaces de deformarse bajo esfuerzo y recuperar su forma original, lo que los convierte en materiales esenciales en aplicaciones cotidianas como llantas, guantes o empaques industriales (Kwietniewski & Miedzińska, 2019). Tradicionalmente, el negro de humo (carbon black), derivado de combustibles fósiles, ha sido el refuerzo principal para mejorar sus propiedades mecánicas, incrementando resistencia, dureza y durabilidad (Kyei-Manu et al., 2025). Sin embargo, la producción de negro de humo implica elevados costos energéticos y emisiones

contaminantes. En este contexto, el biocarbón surge como una alternativa sostenible, al ser obtenido mediante pirólisis de biomasa residual y presentar características similares en cuanto a estructura carbonosa, porosidad y estabilidad, lo que le permite actuar como sustituto parcial o total del negro de humo (Karunanayake et al., 2025).

Estudios recientes han explorado el concepto de refuerzo dual, combinando biocarbón con nanopartículas metálicas como óxidos de zinc o plata, con el objetivo de potenciar propiedades adicionales como conductividad eléctrica, resistencia al desgaste y funcionalidades antimicrobianas (Krainoi et al., 2023). Este enfoque busca generar un efecto sinérgico donde cada fase reforzante aporte características complementarias que mejoren el desempeño global del material compuesto.

En términos generales, la incorporación de partículas en matrices poliméricas permite incrementar la rigidez, estabilidad térmica y propiedades funcionales debido a su alta área superficial y capacidad de interacción interfacial (Sinha Ray & Okamoto, 2003). Sin embargo, uno de los principales retos es evitar la aglomeración de las partículas y asegurar una adecuada dispersión dentro de la matriz, ya que esto influye directamente en la transferencia de esfuerzos y en la eficiencia del refuerzo.

En este contexto, el biocarbón actúa como una plataforma estructural adecuada debido a su porosidad, área superficial y presencia de grupos funcionales superficiales, los cuales facilitan el anclaje o deposición de nanopartículas metálicas. Esta configuración jerárquica favorece una mejor distribución del refuerzo y promueve interacciones adicionales con la matriz elastomérica, mejorando propiedades mecánicas y funcionales (Ahmad et al., 2014). La figura 2 muestra de manera esquemática este mecanismo dual de la interacción interfacial generada en el sistema compuesto.

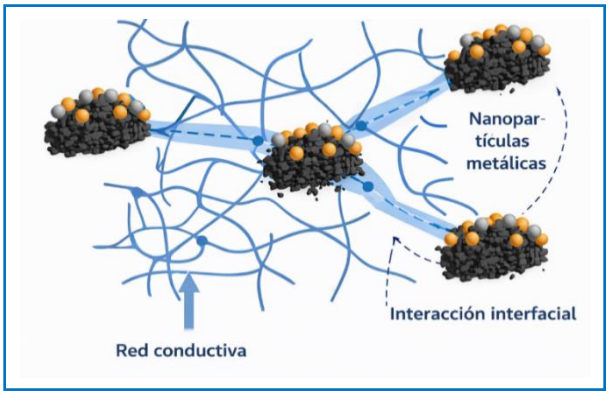


Figura 15. Elastómero reforzado con biocarbón y nanopartículas metálicas.

Particularmente en elastómeros, el sistema biocarbón–nanopartículas representa una alternativa sostenible frente a refuerzos tradicionales como el negro de humo, permitiendo no solo mejorar el módulo elástico y la resistencia al desgaste, sino también favorecer propiedades avanzadas como conductividad o actividad antimicrobiana. Esta sinergia posiciona al biocarbón como un refuerzo versátil y funcional en el desarrollo de elastómeros avanzados con aplicaciones en sectores automotriz, biomédico y de electrónica flexible (Krainoi et al., 2023).

APLICACIONES Y BENEFICIOS PRÁCTICOS

El uso de biocarbón como refuerzo en elastómeros permite explorar múltiples aplicaciones prácticas en distintos sectores. En la industria automotriz, diversos estudios han reportado mejoras cuantificables en propiedades mecánicas cuando el biocarbón se incorpora como sustituto parcial del negro de humo. Por ejemplo, se ha observado un incremento en el módulo elástico entre 15 y 35 %, así como aumentos en la resistencia a la tracción de hasta 20 %, dependiendo de la temperatura de pirólisis y el contenido de carga (Greenough et al., 2021). Asimismo, algunos trabajos reportan mejoras en estabilidad térmica, evidenciadas por aumentos en la temperatura de degradación superiores a 10–25 °C en comparación con elastómeros sin refuerzo.

Estos resultados indican que el desempeño mejorado se refleja principalmente en mayor rigidez, mejor transferencia de esfuerzos matriz–refuerzo y estabilidad térmica comparable a la obtenida con negro de humo convencional, especialmente cuando el biocarbón es producido a temperaturas superiores a 500 °C, donde se favorece una estructura más aromática y estable. De esta manera, el biocarbón no solo representa una alternativa sostenible, sino también técnicamente viable para aplicaciones como llantas, sellos y componentes elastoméricos sometidos a esfuerzos mecánicos cíclicos (Das et al., 2021).

En el ámbito médico, diversos estudios han reportado que la incorporación de biocarbón y nanopartículas metálicas en matrices elastoméricas puede incrementar la resistencia al desgaste y la estabilidad mecánica, prolongando la vida útil del material. Por ejemplo, compuestos elastoméricos reforzados

con biocarbón han mostrado reducciones en la tasa de desgaste superiores al 25 % y mejoras en resistencia a la tracción entre 15 y 30 %, dependiendo del porcentaje de carga y temperatura de pirólisis (Das et al., 2021; Di Bernardo et al., 2025). Cuando estos sistemas se combinan con nanopartículas metálicas como ZnO o Ag, además de mejorar propiedades mecánicas, se han observado efectos antimicrobianos significativos, particularmente frente a *E. coli* y *S. aureus*, lo que amplía su potencial en dispositivos biomédicos (Raghupathi et al., 2011).

En la industria de empaques, elastómeros y biocompuestos con biocarbón han propiciado mejoras en estabilidad térmica y reducción en permeabilidad a gases, asociadas a la formación de trayectorias tortuosas en la matriz polimérica. Por tanto, se han reportado incrementos en temperatura de degradación térmica de 10–30 °C y disminuciones en permeabilidad al oxígeno de hasta 20 % en sistemas poliméricos con biocarbón (Zhang et al., 2020), lo que puede traducirse en una mayor vida útil del producto y mejor conservación de alimentos.

En términos económicos, estudios de evaluación comparativa indican que la sustitución parcial del negro de humo por biocarbón puede reducir costos de materia prima entre 10 y 20 %, dependiendo de la fuente de biomasa y la escala de producción, además de fomentar cadenas de valor asociadas a la economía circular.

Entre los residuos agroindustriales comúnmente empleados para la obtención de biocarbón se encuentran las cáscaras de arroz, el bagazo de caña de azúcar, los residuos de maíz, el aserrín y los restos de poda forestal, los cuales han demostrado ser técnicamente viables para producir materiales carbonosos con propiedades adecuadas para aplicaciones en compuestos elastoméricos (Lehmann & Joseph, 2024).

RETOS Y PERSPECTIVAS FUTURAS

A pesar de los avances recientes en el uso del biocarbón como refuerzo en elastómeros, aún existen diversos desafíos técnicos que limitan su implementación a gran escala. Uno de los principales retos radica en el escalamiento industrial del proceso de pirólisis, el cual requiere un control preciso de temperatura, atmósfera y tiempo de residencia para asegurar la

calidad y homogeneidad del biocarbón obtenido (Lehmann & Joseph, 2024). No obstante, estos desafíos constituyen un punto de partida para la generación de nuevas líneas de investigación orientadas a optimizar el conocimiento y las aplicaciones en este campo. En la actualidad, se exploran rutas para producir biocarbón funcionalizado mediante tratamientos químicos o físicos que optimicen su compatibilidad con matrices poliméricas, así como nuevas mezclas híbridas que integren nanopartículas metálicas, óxidos o grafeno para lograr refuerzos más eficientes y multifuncionales (Aboughaly et al., 2023). Estas innovaciones apuntan hacia materiales más ligeros, duraderos y con propiedades ajustables según la aplicación, desde la automoción hasta la biomedicina.

En un panorama global, la transición hacia materiales sostenibles se está consolidando como una prioridad industrial y ambiental. Organismos internacionales y grandes corporaciones impulsan políticas para sustituir progresivamente derivados del petróleo por alternativas renovables y de bajo impacto ambiental, alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU y la economía circular. En este contexto, el biocarbón surge no solo como un material versátil, sino como un vector de innovación "verde" capaz de redefinir el futuro de los elastómeros y de la ingeniería de materiales.

CONCLUSIONES

El biocarbón, producido a partir de biomasa mediante procesos de pirólisis, constituye una alternativa viable y sostenible para el refuerzo de elastómeros. Su incorporación en matrices poliméricas permite contribuir a la mejora de propiedades mecánicas y térmicas, al tiempo que promueve el aprovechamiento de residuos orgánicos y reduce la dependencia de materiales derivados del petróleo. Esta evidencia respalda el potencial del biocarbón como componente clave en el desarrollo de una nueva generación de compuestos elastoméricos más eficientes y respetuosos con el medio ambiente, en concordancia con los principios de sostenibilidad y economía circular.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Coahuila y al Posgrado de Ciencia y Tecnología de Materiales por el acceso a la información para desarrollar este trabajo; asimismo, a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación del Gobierno de México por el apoyo con la beca número 2170506.

Se agradece el apoyo brindado a través del Proyecto Interno CIQA-6793: "Hacia una valorización superior de biomasa mediante pirólisis para la obtención de compuestos poliméricos semiconductores sustentables con un enfoque en aplicaciones emergentes".

REFERENCIAS

Aboughaly, M., Babaei-Ghazvini, A., Dhar, P., Patel, R., & Acharya, B. (2023). Enhancing the potential of polymer composites using biochar as a filler: A review. *Polymers, 15*(19), 3981. https://doi.org/10.3390/polym15193981

Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., Vithanage, M., Lee, S. S., & Ok, Y. S. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere, 99*, 19–33. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071

Bélanger, N., Prasher, S., & Dumont, M. J. (2023). Tailoring biochar production for use as a reinforcing bio-based filler in rubber composites: A review. *Polymer-Plastics Technology and Materials, 62*(1), 54–75. https://doi.org/10.1080/25740881.2022.2089584

Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy, 38*, 68–94. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048

Bustamante García, V., Carrillo Parra, A., Prieto Ruíz, J. Á., Corral-Rivas, J. J., & Hernández Díaz, J. C. (2017). Química de la biomasa vegetal y su efecto en el rendimiento durante la torrefacción: Revisión. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 7*(38), 5–24. https://doi.org/10.29298/rmcf.v7i38.8

Das, C., Tamrakar, S., Kiziltas, A., & Xie, X. (2021). Incorporation of biochar to improve mechanical, thermal and electrical properties of polymer composites. *Polymers, 13*(16), 2663. https://doi.org/10.3390/polym13162663

Di Bernardo, C., Messori, M., & Noè, C. (2025). Rethinking biochar reinforcement role in elastomer composites for greener tire manufacture. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 13*(37), 15421–15434. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.5c05447

Escalante Rebolledo, A., Pérez López, G., Hidalgo Moreno, C., López Collado, J., Campo Alves, J., Valtierra Pacheco, E., & Etchevers Barra, J. D. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana, 34*(3), 367–382. https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/155

González Velasco, J. (2023). Energía a partir de la biomasa: Un análisis técnico y contextual. *Encuentros Multidisciplinares*, 74, 1–66. http://www.encuentros-multidisciplinares.org/revista-74/jaime-velasco.pdf

Greenough, S., Dumont, M. J., & Prasher, S. (2021). The physicochemical properties of biochar and its applicability as a filler in rubber composites: A review. *Materials Today Communications, 29*, 102912. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102912

Guo, M., Uchimiya, S. M., & He, Z. (2015). Agricultural and environmental applications of biochar: Advances and barriers. In M. Guo, Z. He, & S. M. Uchimiya (Eds.), *Agricultural and environmental applications of biochar: Advances and barriers* (pp. 495–504). Soil Science Society of America. https://doi.org/10.2136/sssaspecpub63.2014.0054

Inventario Nacional de Fuentes de Contaminación Plástica

Kang, M. J., Heo, Y. J., Jin, F. L., & Park, S. J. (2016). A review: Role of interfacial adhesion between carbon blacks and elastomeric materials. *Carbon Letters, 18*(1), 1–10. https://doi.org/10.5714/CL.2016.18.001

Karunanayake, L., Etampawala, T., de Silva, D. J., Bandara, J., Rajapaksha, A. U., & Vithanage, M. (2025). Role and potential of biochar as a sustainable alternative reinforcing filler to carbon black in rubber composites. *Biochar, 7*, 60. https://doi.org/10.1007/s42773-025-00429-3

Krainoi, A., Prasert, W., Kesakomol, P., Thongdee, P., Nitchaphanit, S., Sungsirin, N., Boonsiri, T., Watanaveeradej, V., Ounjai, K., & Nakaramontri, Y. (2023). Effect of modified zinc oxide nanoparticles on enhancement of mechanical, thermal and antibacterial properties of disinfectant natural rubber latex foams. *Materials Today Communications, 35*, 105601. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105601

Kwietniewski, M., & Miedzińska, D. (2019). Review of elastomeric materials for application to composites reinforced by auxetics fabrics. *Procedia Structural Integrity, 17*, 154–161. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.08.021

Kyei-Manu, W. A., Tunnicliffe, L. B., Herd, C. R., Akutagawa, K., Stoček, R., & Busfield, J. J. C. (2025). Effect of carbon black properties on cut and chip wear of natural rubber. *Wear, 564–565*, 205673. https://doi.org/10.1016/j.wear.2024.205673

Lehmann, J. (2007). A handful of carbon. *Nature, 447*(7141), 143–144. https://doi.org/10.1038/447143a

Lehmann, J., & Joseph, S. (2024). Biochar for environmental management: An introduction. In J. Lehmann & S. Joseph (Eds.), *Biochar for environmental management: Science, technology and implementation* (3rd ed., pp. 1–14). Routledge. https://doi.org/10.4324/9781003297673-1

Lubura, J., Kojić, P., Ikonić, B., Pavličević, J., Govedarica, D., & Bera, O. (2022). Influence of biochar and carbon black on natural rubber mixture properties. *Polymer International, 71*(11), 1347–1353. https://doi.org/10.1002/pi.6439

Raghupathi, K. R., Koodali, R. T., & Manna, A. C. (2011). Size-dependent bacterial growth inhibition and mechanism of antibacterial activity of zinc oxide nanoparticles. *Langmuir, 27*(7), 4020–4028. https://doi.org/10.1021/la104825u

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2023). Inventario Nacional de Fuentes de Contaminación Plástica. Gobierno de México. https://dsiappsdev.semarnat.gob.mx/datos/portal/publicaciones/2023/NFCP_2023.pdf

Sik Ok, Y., Uchimiya, S. M., Chang, S. X., & Bolan, N. (2015). *Biochar: Production, characterization, and applications*. CRC Press. https://doi.org/10.1201/b18920

Sinha Ray, S., & Okamoto, M. (2003). Polymer/layered silicate nanocomposites: A review from preparation to processing. *Progress in Polymer Science, 28*(11), 1539–1641. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2003.08.002

Spokas, K. A. (2010). Review of the stability of biochar in soils: Predictability of O:C molar ratios. *Carbon Management, 1*(2), 289–303. https://doi.org/10.4155/CMT.10.32

Teixeira de Lima, N., de Souza Carneiro Neto, T. F., Souza Pereira Matos, M., Freire de Oliveira, F., de Sousa Araújo, C. A., & Saraiva Tavares Filho, G. (2025). Biocarvão: Características químico-físicas e uso na agricultura. Uma revisão. *Research, Society and Development, 14*(6), e7114648949. https://doi.org/10.33448/rsd-v14i6.48949

Zhang, Q., Zhang, D., Xu, H., Lu, W., Ren, X., Cai, H., Lei, H., Huo, E., Zhao, Y., Qian, M., Lin, X., Villota, E. M., & Mateo, W. (2020). Biochar filled high-density polyethylene composites with excellent properties: Towards maximizing the utilization of agricultural wastes. *Industrial Crops and Products, 146*, 112185. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112185

CEREALES Y BEBIDAS FERMENTADAS COMO UN VEHÍCULO DE FUNCIONALIDAD Y TRANSPORTE DE NUTRIENTES

CEREALS AND FERMENTED BEVERAGES AS VEHICLES FOR FUNCTIONALITY AND NUTRIENT DELIVERY

SÁNCHEZ FLORES, Citlali [1]

RODRÍGUEZ HERRERA, Raúl [1]

LOREDO TREVIÑO, Araceli [1]

TORRES MARAVILLA, Edgar [2]

VEANA HERNÁNDEZ, Fabiola [3]

FLORES GALLEGOS, Adriana Carolina [1]

1. Departamento de Investigación en Alimentos, Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de Coahuila. Saltillo, Coahuila, México.

2. Facultad de Medicina y Nutrición, Universidad Autónoma de Baja California. Mexicali, Baja California, México.

3. Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica, Instituto Tecnológico de Ciudad Valles. Ciudad Valles, San Luis Potosí, México.

RESUMEN

Desde tiempos antiguos se han consumido diversos alimentos fermentados entre ellos las bebidas fermentadas tradicionales preparadas a partir de cereales básicos que a nivel mundial constituye una de las principales fuentes de energía y nutrientes aportando carbohidratos, proteínas, fibra dietética, vitaminas, minerales y fitoquímicos tales como compuestos fenólicos y flavonoides. Durante el proceso de fermentación, la actividad metabólica de los microorganismos modifica la composición de las materias primas lo cual favorece la liberación de nutrientes, la reducción de antinutricionales y la formación de diversos metabolitos que pueden mejorar la biodisponibilidad además del aspecto sensorial del producto final. Entre las diversas materias primas que se pueden emplear, los cereales destacan por la amplia disponibilidad y capacidad de adaptación, siendo utilizados en bebidas comúnmente conocidas en varias regiones del mundo tales como en México y parte de Latinoamérica el pozol, tejuino, tesgüino, chicha, atole agrio, mientras que el ogí y mahewu se consumen en continentes de África y Asia, reflejando la diversidad cultural y el aprovechamiento de los recursos locales aplicando métodos como el remojo, germinación, tostado o la nixtamalización que potencializan las propiedades nutricionales y tecnológicas de los cereales. No obstante, la variabilidad de las materias primas y la estandarización limitada de los procesos fermentativos continúan representando desafíos en la producción. En este contexto, la presente revisión analiza el papel de los cereales y de las bebidas fermentadas como matrices para el transporte de nutrientes y de compuestos funcionales destacando su potencial para el desarrollo de alimentos innovadores, sostenibles y con valor agregado.

Palabras clave: *fermentación; cereales; valor nutricional; compuestos bioactivos*.

Correspondencia
carolinaflores@uadec.edu.mx
https://orcid.org/0000-0001-5092-1404

Fecha de recepción
20 de marzo de 2026.
Fecha de aceptación
28 de agosto de 2026.

Este artículo fue sometido a revisión por pares doble ciego

ABSTRACT

Since ancient times, people have consumed a variety of fermented foods, including traditional fermented beverages made from staple grains, which are among the world's primary sources of energy and nutrients. These grains provide carbohydrates, proteins, dietary fiber, vitamins, minerals, and phytochemicals such as phenolic compounds and flavonoids. During fermentation, the metabolic activity of microorganisms modifies the composition of the raw materials, promoting the release of nutrients while reducing antinutritional factors and generating various metabolites that enhance the bioavailability and sensory properties of the final product. Among the various raw materials used for fermentation, grains stand out because of their wide availability and adaptability. They are the basis of traditional beverages consumed in many regions of the world. In Mexico and other parts of Latin America, they include pozol, tejuino, tesgüino, chicha, and atole agrio, whereas ogí and mahewu are widely consumed in Africa and Asia. These beverages reflect cultural diversity and the use of locally available resources through processing methods such as soaking, germination, roasting, and nixtamalization, which improve the nutritional and technological properties of cereals. However, the variability of raw materials and the limited standardization of fermentation processes continue to present challenges for large-scale production. In this context, this review examines the role of cereals and cereal-based fermented beverages as matrices for delivering nutrients and functional compounds, highlighting their potential for the development of innovative, sustainable, and value-added foods.

Keywords: *fermentation; cereals; nutritional value; bioactive compounds.*

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el crecimiento de la población mundial, los cambios en los hábitos alimentarios y la prevalencia de enfermedades relacionadas con la dieta han impulsado la búsqueda de estrategias que mejoren la calidad nutricional de los alimentos. En este contexto, el desarrollo e innovación de alimentos funcionales capaces de proporcionar no solo los nutrientes esenciales, sino también de ser una fuente activa de compuestos bioactivos han destacado tanto en el ámbito científico como en la industria alimentaria,

la cual se posiciona como un potencial para responder a las demandas de los consumidores, quienes cada vez más se interesan por alimentos más saludables y sostenibles.

Entre los diferentes grupos de alimentos se encuentran los cereales, siendo cultivos fundamentales en la alimentación humana constituyendo una de las fuentes principales de energía y nutrientes para la mayor parte de la población mundial, además de representar más del 74 % de la superficie cultivada total, constituyendo el 60 % en peso de la producción mundial de alimentos dentro de los cuales se encuentran la cebada (*Hordeum vulgare* L.), maíz (*Zea mays* L.), mijo (*Panicum miliaceum* L.), avena (*Avena sativa* L.), arroz (*Oryza glaberrima / Oryza sativa*), centeno (*Secale cereale*), sorgo (*Sorghum bicolor)* y trigo (*Triticum aestivum* L.) (Baniwal et al., 2021). Los cereales son gramíneas pertenecientes a la familia Poaceae, que más allá de su aporte de carbohidratos, proteínas, fibra dietética, vitaminas y minerales se caracterizan por el contenido de fitoquímicos bioactivos que desempeñan un papel importante en funciones específicas humanas como acción antioxidante, antiinflamatoria, regulación de hormonas, mejoramiento del sistema inmunológico entre otros (Blandino et al., 2003; Xiong et al., 2022). Por ello, estas características han impulsado su uso no solo como alimentos básicos, sino también como ingredientes en el desarrollo de productos con valor agregado.

Paralelamente, las bebidas fermentadas se han consumido durante siglos en diversas regiones del mundo, constituyendo una de las categorías de alimentos con mayor potencial para la incorporación y/o liberación de nutrientes y compuestos bioactivos, clasificándose en lácteos, frutas y verduras, legumbres, cereales, café o té. Sin embargo, comparten la misma funcionalidad: aumentar la energía y combatir el envejecimiento, la fatiga, el estrés e incluso las enfermedades (Sethi et al., 2016). Para llevar a cabo el desarrollo de estas bebidas se utiliza uno de los procesos más antiguos: la fermentación, que se basa en una transformación bioquímica que modifica la composición de las materias primas, favoreciendo así la generación de metabolitos de interés y la reducción de factores antinutricionales, así como cambios en la disponibilidad de nutrientes (Ignat et al., 2020). Además, la actividad microbiana puede contribuir a la formación de compuestos que influyen tanto en las propiedades tecnológicas, nutricionales como sensoriales de los productos fermentados.

Por lo cual, la combinación de cereales y de procesos fermentativos representa una estrategia para el desarrollo e innovación de alimentos funcionales, donde técnicas como el remojo, el germinado, el malteado, la cocción, la molienda y el filtrado representan una alternativa para mejorar tanto el aspecto sensorial como la disponibilidad de nutrientes, compuestos bioactivos e inclusive de algunos probióticos (Ignat et al., 2020). Debido a ello, los cereales y las bebidas fermentadas pueden considerarse vehículos eficaces para el transporte de nutrientes y compuestos bioactivos, lo que contribuye a mejorar su accesibilidad y su aprovechamiento por el organismo.

A pesar de los constantes avances en los procesos fermentativos y de la creciente diversidad de bebidas elaboradas a partir de cereales, aún persisten muchos desafíos relacionados con la comprensión de los mecanismos mediante los cuales las materias primas, los microorganismos y las condiciones de fermentación interactúan entre sí para dar lugar a la funcionalidad de los productos finales. Por ello, el objetivo de la presente revisión es ofrecer una visión general del panorama de las bebidas fermentadas a partir de cereales, así como de su composición, del transporte de nutrientes y del impacto en la disponibilidad de compuestos bioactivos.

2. De lo tradicional a lo estandarizado

Tradicionalmente y hasta el día de hoy aún prevalecen culturas en donde las bebidas fermentadas se siguen consumiendo y elaborando de manera tradicional, esto quiere decir que surgen de manera espontánea sin la necesidad de añadir un cultivo iniciador, lo cual se debe a la presencia de microorganismos autóctonos de las materias primas que presentan características tecnológicas notables, estos microorganismos suelen ser consorcios en lugar de cultivos puros, por lo que pueden estar formados por bacterias de diferentes especies. Sin embargo, durante el proceso deben tener la capacidad de multiplicarse a niveles elevados para actuar como un cultivo iniciador, con la finalidad de prevenir la proliferación de microorganismos patógenos que afecten negativamente al producto (Cuvas-Limon et al., 2021).

A partir de ello, se ha ido estudiando cada una de las bebidas fermentadas tradicionales con la finalidad de identificar cómo la interacción entre microorganismos y sustrato influye de manera significativa en el tipo de

producto que se obtiene. Dentro de la literatura se menciona el aislamiento de microorganismos de bebidas fermentadas espontáneamente para identificarlos e inducirlos a un sustrato en condiciones ya controladas tratando de producir o mejorar la misma bebida además de estudiar la dinámica microbiana, a dicho proceso se le conoce como fermentación inducida (figura 1), el cual se basa en la adición de un cultivo iniciador ya conocido tal como *Lacticaseibacillus, Lactococcus, Streptococcus,* permitiendo un mejor control del proceso, periodos más cortos y menor riesgo de contaminación por microorganismos patógenos así como una mejor calidad de conservación del producto (Sionek et al., 2023).

Por otra parte, la fermentación por reverso (backslopping) consiste en retener una porción de una sustancia previamente fermentada como iniciador, que luego se mezcla con una parte fresca para la fermentación lo cual a diferencia de las fermentaciones espontáneas se utilizan iniciadores muy activos que aceleran el proceso de fermentación reduciendo tiempos y mejorando la eficiencia demostrándose cierta inhibición en patógenos y de deterioro mediante la producción de ácidos orgánicos, peróxido de hidrógeno y bacteriocinas, así como la disminución del pH y potencial de oxidación reducción (Moran et al., 2006; Zhang et al., 2025).

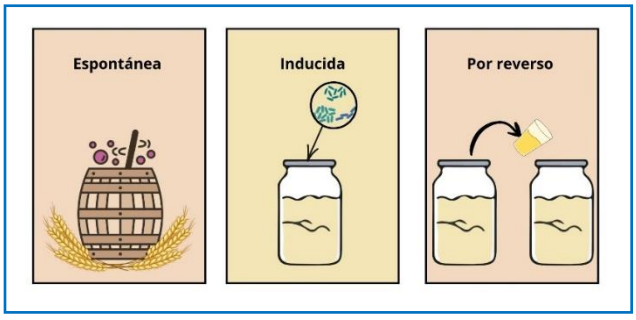


Figura 16.
Tipos de fermentación.
Imagen propia.

Existen bebidas en donde se lleva a cabo una doble fermentación: la primera consiste en una masa enriquecida con microorganismos fermentadores que se deja fermentar durante un tiempo (tres a cinco días) para posteriormente adicionar agua y, en combinación con otra matriz, dar paso a una segunda fermentación que se realiza de manera natural de tres a diez días a temperatura ambiente con el propósito de potencializar nutrientes, sabores y texturas (Tanguler & Erten, 2012).

3. DE CEREALES A BEBIDAS FERMENTADAS

Como se ha mencionado anteriormente la preparación y fermentación tradicional de las bebidas fermentadas se realiza de manera espontánea, caracterizándose por las diferentes comunidades microbianas; esta microflora determina las cualidades de los productos fermentados. El proceso de elaboración inicial se comparte entre bebidas fermentadas tradicionales (figura 2) comenzando por la limpieza de granos, seguido de algún tratamiento de remojo, germinación u otro dependiendo del tipo de bebida, posteriormente se realiza una molienda en húmedo o seco obteniendo masa o harina el cual pasa por un proceso de cocción para obtener una gelatinización del almidón, así como de la liberación de azúcares fermentables que serán utilizados por la microbiota nativa durante el proceso de fermentación espontánea, aunque algunas de las bebidas no requieren de una cocción por lo que se realiza la fermentación y posteriormente su consumo (Ignat et al., 2020; Madilo et al., 2024).

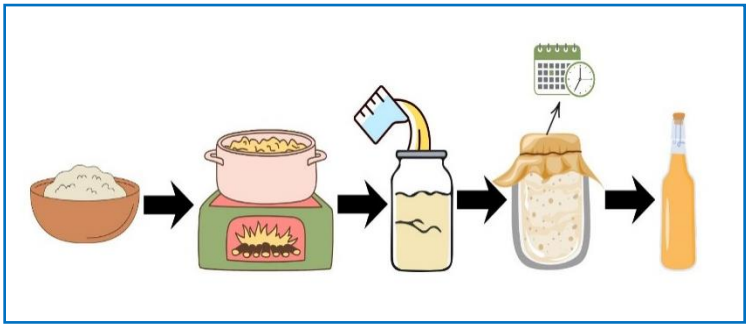


Figura 2.
Proceso de fermentación.
Imagen propia.

El conocimiento en la elaboración de bebidas fermentadas tradicionales se conoce en todo el mundo, principalmente en países africanos, donde su consumo es aún mayor, siendo una práctica comúnmente realizada para saciar el hambre, puesto que cereales como el mijo, maíz y sorgo son accesibles para cultivar. En Nigeria se prepara una bebida llamada Ogi, a partir de maíz, sorgo y mijo, que se caracteriza por tener una consistencia a papilla fermentada con una textura muy suave y un sabor ácido similar al de un yogurt. Su consumo es tanto para personas adultas como para bebés, ya que al no contar con un fácil acceso a fórmulas lácteas se opta por el consumo de esta bebida (Banigo & Muller, 1972). El Mahewu es una bebida refrescante que se obtiene de la fermentación espontánea del maíz cocido, mijo o malta de sorgo. Se consume en países como Zimbabue, donde, al igual que el Ogi, se considera un alimento complementario para bebés. Durante la cocción la

textura tiene una semejanza a una papilla de maíz, dicha microbiota que se encuentra es inactivada mediante la adición de malta de mijo o sorgo sin calentamiento (Pswarayi & Gänzle, 2019). El masvusvu se prepara con mijo molido, obteniendo una bebida dulce, mientras que el mangisi es el resultado de la fermentación natural del masvusvu tamizado, dando como resultado un producto con sabor agridulce. Ambos, de color marrón claro, se consumen como refrescos (Zvauya et al., 1997).

México no se queda atrás, desde tiempos prehispánicos se han elaborado diversas bebidas fermentadas principalmente utilizando maíz en sus diferentes presentaciones. Una de ellas es el pozol de origen prehispánico de la cultura maya, es una bebida no alcohólica consumida en estados del sur de México, su preparación se realiza utilizando bolas de masa de maíz previamente nixtamalizado las cuales se envuelven en hojas de plátano y se dejan fermentar a temperatura ambiente de 2 a 7 días, luego se suspende en agua y adicionalmente se le puede añadir masa de batata , cacao tostado, coco, canela o vainilla (Ben Omar & Ampe, 2000; Velázquez-López et al., 2018; Robledo-Márquez et al., 2021). El sendechó (sendech'o o zeyrecha) es una bebida de la época prehispánica utilizada por los otomíes y los mazahuas, se elabora con maíz malteado pigmentado y de chile la cual se fermenta con pulque, su preparación consiste en colocar granos de maíz en una cesta natural con hojas de Buddleja americana la cual se expone al sol y se dejan en remojo continuo de cuatro a cinco días para que germinen los granos los cuáles se llevan a secar y se muelen con chile, obteniéndose una harina que se cuece en una olla de barro con agua, una vez fría la mezcla se añade un cultivo iniciador llamado íxquini la cual es una porción de un sendecho o pulque previamente fermentado, al final se obtiene una bebida con sabor suave dulce y ligeramente ácido de color blanco o rojo llamada también ctōe (Robledo-Márquez et al., 2021).

El tejúino es una bebida fermentada originaria de Jalisco, pero también muy popular en estados como Sonora, Chihuahua y Durango. En tiempos precolombinos, esta bebida se consumía para saciar la sed, proporcionar energía y refrescar a las personas que realizaban largos viajes. Su elaboración se basa en masa de maíz y piloncillo, cuya mezcla se deja fermentar durante varios días. En Jalisco se acostumbra a tomarlo mezclado con nieve de limón y chile piquín en polvo. Regularmente, su consumo se da en fiestas, ceremonias tradicionales y festividades patronales, aunque hoy en día es muy común encontrarlo en los mercados o en puestos callejeros. La diferencia entre el tejuino tradicional y comercial se basa en el tipo de maíz utilizado ya

que para el comercial se elabora con maíz nixtamalizado mientras que para el tejuino artesanal es con maíz germinado y fermentado (Aguilar-Uscanga et al., 2024). Mientras que el tesgüino es elaborado por diferentes grupos étnicos del norte del país como los rarámuris, wirijas, yakis, seris y tepehuanos, el consumo de esta bebida es para fines ceremoniales, su elaboración parte de granos de maíz germinado los cuales se hierven y fermentan como malta para elaborar un tipo de cerveza, que de acuerdo con el tipo de maíz utilizado varían los compuestos bioactivos en la bebida por lo que la diversidad microbiana es diferente en cada una. Esto deja en claro que aunque el tesgüino y el tejuino comparten orígenes en común son bebidas completamente diferentes ya que el tesgüino es el resultado de una fermentación alcohólica de un tipo de malta de maíz (maíz germinado y cocido en agua) alcanzando concentraciones de etanol de 16 % p/p, mientras que el tejuino es el resultado de una fermentación láctico-acética corta de un atole de maíz que se obtiene al cocinar la masa diluida con pan de azúcar el cual presenta o no bajos niveles de etanol, por lo que la microbiota de ambas bebidas es diferente para cada caso (Arrizon, 2022).

El tascalate es una herencia ancestral de los pueblos indígenas de Chiapas, se considera una bebida energizante y se elabora a partir de una mezcla de granos de maíz, cacao tostado y molido mezclado con achiote y saborizado con canela y azúcar, estos últimos ingredientes se adicionan cuando no se logra vender parte del producto a un precio razonable por lo cual se le da un valor agregado adicionándole ingredientes antes mencionados, obteniendo un producto con valor energético que se acostumbra a ingerir a medio día y como un paliativo entre comidas en las ciudades o localidades urbanas (Cadena-Iñiguez & De la Cruz-Morales, 2012).

El tejate es una bebida de origen mixteco/zapoteco, que se elabora y consume en el sur del Pacífico del país, siendo típica en el estado de Oaxaca. Parte de una mezcla de masa, cacao y semillas de mamey (*Mammea americana L.)* tostadas y molidas, utilizando una infusión de una flor llamada "Rosita del Cacao", parte de una fermentación breve que se sirve a consumidores de la calle, no hay estudios donde se describa la composición microbiana sin embargo se sabe que contiene compuestos bioactivos extraídos de sus principales sustratos como lo son el cacao y mamey (Arrizon, 2022). Finalmente, el atole agrio es una bebida ácida y sin alcohol que se consume en el sureste de México, especialmente en los estados de Tabasco, Chiapas y sur de Veracruz, existen diversas formas de preparación, en algunos estudios se menciona que se utiliza maíz joven no nixtamalizado mientras que otros

describen métodos disponibles para hacer atole agrio a partir de maíz nixtamalizado, otro de los métodos es utilizar masa de maíz fermentada diluida en agua y llevada a ebullición, así como también la utilización de masa fresca que permite que la bebida resultante repose en un lugar cálido hasta que se complete la fermentación, el tiempo de fermentación puede ser de pocas horas e inclusive días dependiendo del sabor deseado, teniendo en cuenta que el atole agrio es la única bebida que necesita hervirse antes de su consumo y normalmente se bebe caliente (Väkeväinen et al., 2020; Reyes-Pavón et al., 2024). En la tabla 1 se presentan los principales microorganismos involucrados en dichas bebidas fermentadas.

Tabla 6. Principales microorganismos presentes en bebidas tradicionales.

Bebida fermentada	Microorganismos presentes en las bebidas	Referencias
Ogí	*Lactiplantibacillus plantarum, Leuconostoc mesenteroides, Pediococcus acidilacici, Limosilactobacillus fermentum*	(Adesemoye et al., 2025)
Mahewu	*Lactococcus lactis subsp. lactis*	(Mashau et al., 2021)
Pozol	*L. plantarum, L. fermentum, L. lactis, Streptococcus suis, Acetobacter, Saccharomyces cerevisiae, Candida spp, Aspergillus*	(López-Reynoso et al., 2026)
Tejuino	*Weissella cibaria* CIATEJ BI-48.1, *Leuconostoc citreum* CIATEJ BI-49.1, *Bacillus safensis* CIATEJ BI-75.1, *Pseudomonas brenneri* CIATEJ BI-26.2, *Pseudomonas psychrophila* CIATEJ BI-27.1, *Chryseobacterium bovis* CIATEJ BI-55.1, *Acetobacter tropicalis* CIATEJ BI-84.1, *Brochothrix thermosphacta* CIATEJ BI-2.1, *Corynebacterium calluane* CIATEJ BI-4.1, *Kurthia gibsonii*CIATEJ BI-4.5 y *Pantoea vagans*	(Reyes-Pavón et al., 2024)
Tesgüino	*Bacillus, Lactobacillus, Leuconostoc, Brettanomyces, Candida, Pichia, Saccharomyces, Aspergillus, Penicillium*	(Aguilar-Uscanga et al., 2024;
Atole agrio	*Bacillus, Enterococcus, Clostridium, Lactobacillus, Lactococcus, Candida, Cryptococcus, Clavispora, Hanseniaspor, Pichia Saccharomycesa, Fusarium, Penicillium.*	(Ojeda-Linares et al., 2021)

4. BENEFICIOS Y FUNCIONALIDAD DE LAS BEBIDAS FERMENTADAS

Como se ha mencionado anteriormente, los cereales forman parte de la dieta de miles de personas, siendo una alternativa a los productos lácteos, representando además una fuente de alimentos mucho más económica y viable. Por lo tanto, la combinación con procesos de fermentación contribuye de diversas formas a obtener una bebida con beneficios diversos; se ha encontrado que este proceso permite reducir antinutrientes y micotoxinas, así

como aumentar los niveles de minerales y vitaminas (Setta et al., 2020). Mientras que la fibra soluble e insoluble aporta beneficios para la salud intestinal, la reducción del colesterol, el control de la glucemia y el control del peso, considerándose, asimismo, fuente de prebióticos al estimular el crecimiento de microorganismos benéficos en el intestino (figura 3) (Fernandes et al., 2018).

La fermentación también ayuda a mejorar el aspecto sensorial, la calidad, la composición nutricional y el perfil bioactivo, los cuales se atribuyen a la diversidad microbiana que se encuentra en la bebida (Hidalgo-Fuentes et al., 2024). Aunque hay pocos estudios donde se describen los beneficios de las bebidas fermentadas a partir de cereales, se ha encontrado que el pozol ayuda a controlar la diarrea y a reducir la fiebre (Rizo et al., 2020). Otro estudio menciona que los mayas utilizaban el pozol para curar problemas gastrointestinales como la diarrea y las enfermedades de la piel mientras que los lacandones lo usaban para bajar la fiebre (Patra et al., 2023). La chicha es rica en vitamina B, mientras que el tesgüino es rico en vitaminas y enzimas y, además, es una bebida refrescante. La Bussa es una bebida que contiene proteína cruda, tiamina y riboflavina, el Ogí ayuda en el control de la gastroenteritis al ser rico en vitaminas, proteínas y minerales (Chaudhary et al., 2014). El tejuino es una bebida funcional que contiene una gran variedad de microorganismos; además, algunas cepas aisladas de esta bebida pueden sintetizar varios tipos de galactooligosacáridos, entre los cuales se incluyen 6-galactobiosa, alolactosa, 3-galactosil-lactosa, 6-galactotrosa y -galactosil-lactosa, los cuales pueden tener efecto prebiótico (Aguilar-Uscanga et al., 2024). La fermentación de los cereales para la producción de bebidas induce una serie de cambios y transformaciones fisicoquímicas, lo que desbloquea un gran potencial nutricional en varios de los cereales consumidos en el mundo.

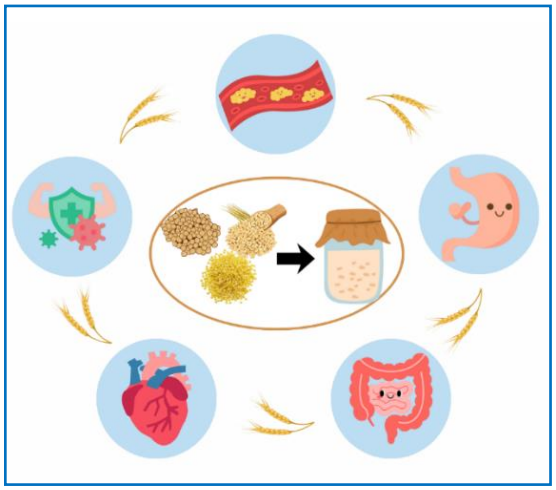


Figura 3. Beneficios de las bebidas fermentadas. Imagen propia.

CONCLUSIONES

La fermentación es uno de los procesos más antiguos y tradicionalmente utilizados, y hasta el día de hoy se sigue practicando, ya sea de manera tradicional o más innovada. Tal es el caso de los países en desarrollo, donde la seguridad alimentaria es un desafío persistente y se ven obligados a mejorar dichos procesos de producción. Por ello, las bebidas funcionan como vehículos para transportar nutrientes y compuestos bioactivos. Diversas bebidas fermentadas han sido objeto de estudio para identificar los microorganismos que intervienen en dichos procesos, ya que el conocimiento sobre estos microorganismos ayuda a optimizar los procesos fermentativos y a mejorar las propiedades nutricionales y funcionales, contribuyendo así a la seguridad alimentaria y a la sostenibilidad al obtener alimentos más saludables y nutritivos. Sin embargo, a pesar del creciente interés por las bebidas elaboradas a partir de cereales, aún existe conocimiento muy limitado sobre cómo interactúan los distintos cereales, sus compuestos y los microorganismos fermentadores, por lo cual se espera que en un futuro existan avances en la comprensión del comportamiento de cada una de las bebidas.

AGRADECIMIENTOS

Citlali Sánchez-Flores agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca de maestría otorgada con número de beca 4032903.

REFERENCIAS

Adesemoye, E. T., Sanni, A. I., Spano, G., Capozzi, V., & Fragasso, M. (2025). Lactic acid bacteria diversity in fermented foods as potential bio-resources contributing to alleviate malnutrition in developing countries: Nigeria as a case study. *Fermentation, 11*(2), 103. https://doi.org/10.3390/fermentation11020103

Aguilar-Uscanga, B. R., González-Quezada, E., & Solis-Pacheco, J. R. (2024). Traditional fermented beverages in México. In M. Chávarri Hueda (Ed.), *The science of fermentation* (pp. 1–16). IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.115063

Arrizon, J. (2022). Mexican traditional fermentations from corn (Zea mays): An overview. In M. H. Tunick & E. González de Mejía (Eds.), *Hispanic foods: Chemistry of fermented foods* (pp. 49–57). American Chemical Society. https://doi.org/10.1021/bk-2022-1406.ch004

Banigo, E. O. I., & Muller, H. G. (1972). Manufacture of OGI (a Nigerian fermented cereal porridge): Comparative evaluation of corn, sorghum and millet. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal, 5*(4), 217–221. https://doi.org/10.1016/S0315-5463(72)74132-2

Baniwal, P., Mehra, R., Kumar, N., Sharma, S., & Kumar, S. (2021). Cereals: Functional constituents and its health benefits. *The Pharma Innovation Journal, 10*(2), 343–349. https://doi.org/10.22271/tpi.2021.v10.i2e.5681

Ben Omar, N., & Ampe, F. (2000). Microbial community dynamics during production of the Mexican fermented maize dough pozol. *Applied and Environmental Microbiology, 66*(9), 3664–3673. https://doi.org/10.1128/AEM.66.9.3664-3673.2000

Blandino, A., Al-Aseeri, M. E., Pandiella, S. S., Cantero, D., & Webb, C. (2003). Cereal-based fermented foods and beverages. *Food Research International, 36*(6), 527–543. https://doi.org/10.1016/S0963-9969(03)00009-7

Cadena-Iñiguez, P., & De la Cruz-Morales, F. R. (2012). Comidas y bebidas: Mezcla de saberes y sabores zoques en Chiapas. *Agro Productividad, 5*(4), 18–25. https://doi.org/10.22004/AG.ECON.352234

Chaudhary, D. P., Kumar, S., & Langyan, S. (Eds.). (2014). *Maize: Nutrition dynamics and novel uses*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-81-322-1623-0

Cuvas-Limon, R. B., Nobre, C., Cruz, M., Rodriguez-Jasso, R. M., Ruíz, H. A., Loredo-Treviño, A., Teixeira, J. A., & Belmares, R. (2021). Spontaneously fermented traditional beverages as a source of bioactive compounds: An overview. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 61*(18), 2984–3006. https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1791050

Fernandes, C. G., Sonawane, S. K., & Arya, S. S. (2018). Cereal based functional beverages: A review. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences, 8*(3), 914–919. https://doi.org/10.15414/JMBFS.2018-19.8.3.914-919

Hidalgo-Fuentes, B., de Jesús-José, E., Cabrera-Hidalgo, A. de J., Sandoval-Castilla, O., Espinosa-Solares, T., González-Reza, R. M., Zambrano-Zaragoza, M. L., Liceaga, A. M., & Aguilar-Toalá, J. E. (2024). Plant-based fermented beverages: Nutritional composition, sensory properties, and health benefits. *Foods, 13*(6), 844. https://doi.org/10.3390/foods13060844

Ignat, M. V., Salanţă, L. C., Pop, O. L., Pop, C. R., Tofană, M., Mudura, E., Coldea, T. E., Borşa, A., & Pasqualone, A. (2020). Current functionality and potential

improvements of non-alcoholic fermented cereal beverages. *Foods, 9*(8), 1031. https://doi.org/10.3390/foods9081031

López-Reynoso, M., Martínez-Medina, G. A., Londoño-Hernández, L., Aguilar-Zarate, P., Hernández-Beltrán, J. U., & Hernández-Almanza, A. Y. (2026). Corn-based fermented beverages: Nutritional value, microbial dynamics, and functional potential—An overview. *Foods, 15*(1), 27. https://doi.org/10.3390/foods15010027

Madilo, F. K., Parry-Hanson Kunadu, A., Tano-Debrah, K., Saalia, F. K., & Kolanisi, U. (2024). Diversity of production techniques and microbiology of African cereal-based traditional fermented beverages. *Journal of Food Quality, 2024*(1), 1241614. https://doi.org/10.1155/2024/1241614

Mashau, M. E., Maliwichi, L. L., & Jideani, A. I. O. (2021). Non-alcoholic fermentation of maize (Zea mays) in sub-Saharan Africa. *Fermentation, 7*(3), 158. https://doi.org/10.3390/fermentation7030158

Moran, C. A., Scholten, R. H. J., Tricarico, J. M., Brooks, P. H., & Verstegen, M. W. A. (2006). Fermentation of wheat: Effects of backslopping different proportions of pre-fermented wheat on the microbial and chemical composition. *Archives of Animal Nutrition, 60*(2), 158–169. https://doi.org/10.1080/17450390600562700

Ojeda-Linares, C., Álvarez-Ríos, G. D., Figueredo-Urbina, C. J., Islas, L. A., Lappe-Oliveras, P., Nabhan, G. P., Torres-García, I., Vallejo, M., & Casas, A. (2021). Traditional fermented beverages of Mexico: A biocultural unseen foodscape. *Foods, 10*(10), 2390. https://doi.org/10.3390/foods10102390

Patra, M., Bashir, O., Amin, T., Wani, A. W., Shams, R., Chaudhary, K. S., Mirza, A. A., & Manzoor, S. (2023). A comprehensive review on functional beverages from cereal grains-characterization of nutraceutical potential, processing technologies and product types. *Heliyon, 9*(6), e16804. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16804

Pswarayi, F., & Gänzle, M. G. (2019). Composition and origin of the fermentation microbiota of mahewu, a Zimbabwean fermented cereal beverage. *Applied and Environmental Microbiology, 85*(11), e03130-18. https://doi.org/10.1128/AEM.03130-18

Reyes-Pavón, D., Soto-Sigala, K. S., Cano-Sampedro, E., Méndez-Trujillo, V., Navarro-Ibarra, M. J., Pérez-Pasten-Borja, R., Olvera-Sandoval, C., & Torres-Maravilla, E. (2024). Pigmented native maize: Unlocking the potential of anthocyanins and bioactive compounds from traditional to functional beverages. *Beverages, 10*(3), 69. https://doi.org/10.3390/beverages10030069

Rizo, J., Rogel, M. A., Guillén, D., Wacher, C., Martinez-Romero, E., Encarnación, S., Sánchez, S., & Rodríguez-Sanoja, R. (2020). Nitrogen fixation in pozol, a traditional fermented beverage. *Applied and Environmental Microbiology, 86*(16), e00588-20. https://doi.org/10.1128/AEM.00588-20

Robledo-Márquez, K., Ramírez, V., González-Córdova, A. F., Ramírez-Rodríguez, Y., García-Ortega, L., & Trujillo, J. (2021). Research opportunities: Traditional fermented beverages in Mexico. Cultural, microbiological, chemical, and functional aspects. *Food Research International, 147*, 110482. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110482

Sethi, S., Tyagi, S. K., & Anurag, R. K. (2016). Plant-based milk alternatives an emerging segment of functional beverages: A review. *Journal of Food Science and Technology, 53*(9), 3408–3423. https://doi.org/10.1007/s13197-016-2328-3

Setta, M. C., Matemu, A., & Mbega, E. R. (2020). Potential of probiotics from fermented cereal-based beverages in improving health of poor people in Africa. *Journal of Food Science and Technology, 57*(11), 3935–3946. https://doi.org/10.1007/s13197-020-04432-3

Sionek, B., Szydłowska, A., Küçükgöz, K., & Kołożyn-Krajewska, D. (2023). Traditional and new microorganisms in lactic acid fermentation of food. *Fermentation, 9*(12), 1019. https://doi.org/10.3390/fermentation9121019

Tanguler, H., & Erten, H. (2012). Occurrence and growth of lactic acid bacteria species during the fermentation of shalgam (salgam), a traditional Turkish fermented beverage. *LWT - Food Science and Technology, 46*(1), 36–41. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.10.026

Väkeväinen, K., Hernández, J., Simontaival, A. I., Severiano-Pérez, P., Díaz-Ruiz, G., von Wright, A., Wacher-Rodarte, C., & Plumed-Ferrer, C. (2020). Effect of different starter cultures on the sensory properties and microbiological quality of atole agrio, a fermented maize product. *Food Control, 109*, 106907. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.106907

Velázquez-López, A., Covatzin-Jirón, D., Toledo-Meza, M. D., & Vela-Gutiérrez, G. (2018). Bebida fermentada elaborada con bacterias ácido lácticas aisladas del pozol tradicional chiapaneco. *CienciaUAT, 13*(1), 165–178. https://doi.org/10.29059/cienciauat.v13i1.871

Xiong, Y., Zhang, P., Warner, R. D., Shen, S., & Fang, Z. (2022). Cereal grain-based functional beverages: From cereal grain bioactive phytochemicals to beverage processing technologies, health benefits and product features. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 62*(9), 2404–2431. https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1853037

Zhang, K., Wei, S., Zhang, Y., Meng, X., Ai, Y., Wang, H., & Zhang, H. (2025). Impacts of backslopping fermentation on the hierarchical structure, physicochemical properties and digestibility of mung bean starch. *Food Chemistry, 495*, 146454. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.146454

Zvauya, R., Mygochi, T., & Parawira, W. (1997). Microbial and biochemical changes occurring during production of masvusvu and mangisi, traditional Zimbabwean beverages.

Plant Foods for Human Nutrition, 51(1), 43–51.
https://doi.org/10.1023/A:1007972428849

LA COOPERATIVA DE CASAS BARATAS "PABLO IGLESIAS": VIVIENDA, CIUDAD Y EXILIO COMO INSTITUCIÓN URBANA

THE "PABLO IGLESIAS" CHEAP HOUSING COOPERATIVE: HOUSING, CITY AND EXILE AS AN URBAN INSTITUTION

ROSALES MENDOZA, José Manuel

RESUMEN

La Cooperativa de Casas Baratas "Pablo Iglesias" (CCBPI) se fundó en 1926 en la cuenca de Peñarroya-Pueblonuevo (Córdoba) como estrategia socialista para hacer operable el derecho a la vivienda obrera. Organizó comunidad, ahorro, suelo, proyecto, obra y servicios urbanos mediante una estructura colectiva, en un contexto de precariedad habitacional. En su etapa española (1926–1939) reunió decenas de miles de afiliados, promovió cientos de viviendas y articuló equipamientos vinculados a la Casa del Pueblo. Tras la derrota republicana, parte de sus redes se desplazó a México y la cooperativa se reorganizó en 1939 como entidad legalmente constituida. Este trabajo explora la CCBPI como institución del exilio: una adaptación organizativa orientada a producir ciudad desde la vivienda. Asimismo, examina las aportaciones del arquitecto Francisco Azorín y la presencia del organismo en la Comarca Lagunera.

Palabras clave: *cooperativismo; vivienda obrera; urbanización; exilio republicano español; Francisco Azorín; ideología y vivienda.*

Facultad de Ciencias Sociales,
Universidad Autónoma de Coahuila.
Saltillo, Coahuila, México.

ABSTRACT

Founded in 1926 in the mining basin of Peñarroya-Pueblonuevo (Córdoba), the "Pablo Iglesias" Cheap Housing Cooperative (CCBPI) coordinated savings, land, design, construction, and services in order to deliver workers' housing as a socialist urban project. In Spain (1926–1939) it gathered tens of thousands of members and promoted hundreds of dwellings linked to the Casa del Pueblo. After the Republican defeat, part of its network relocated to Mexico and reorganized the cooperative in 1939. This article reads the CCBPI as an urban

Correspondencia
rosalesmanuel@uadec.edu.mx
https://orcid.org/0000-0001-6197-2135
Fecha de recepción
20 de marzo de 2026.
Fecha de aceptación
21 de agosto de 2026.

Este artículo fue sometido a revisión por pares doble ciego

institution of exile. It also examines the contributions of architect Francisco Azorín and the presence of the organization in the Comarca Lagunera region.

Keywords: *housing cooperativism; workers' housing; urbanization; Spanish Republican exile; Francisco Azorín; ideology and housing.*

INTRODUCCIÓN

En la historia social de la vivienda, la noción de "casa barata" designa un programa habitacional y político, no solo un costo. En la primera mitad del siglo XX, el cooperativismo habitacional formó parte de un debate internacional más amplio sobre la reforma social, la urbanización obrera, el acceso al suelo y el derecho a la vivienda. Desde esa perspectiva, las casas baratas no fueron únicamente unidades domésticas de bajo costo, sino también instrumentos para organizar el ahorro, la propiedad, la infraestructura y la comunidad política. En la España anterior a la Segunda República, la precariedad habitacional obrera fue un campo de disputa entre la filantropía, el mercado y la reforma social. El socialismo español impulsó una vía mediante cooperativas de vivienda ligadas a la Casa del Pueblo y a la Unión General de Trabajadores (UGT). Esa vía buscó operar allí donde el crédito y la renta empujaban hacia la infravivienda. La Cooperativa de Casas Baratas "Pablo Iglesias" (CCBPI) es un caso útil para la historia del hábitat porque su acción excedió la casa y la empresa constructora. Su operación abarcó el suelo, la traza, los servicios, la obra y una comunidad política capaz de sostenerlos, lo que apunta a la necesidad de una lucha sociopolítica organizada por el hogar (Arias González, 2003; Reyna Fernández, 2024).

A diferencia de otras cooperativas socialistas, la CCBPI fue considerada "la gran joya del cooperativismo socialista español". Con casi 70,000 afiliados, construyó centenares de viviendas y manejó recursos inusuales; llegó a contar con instrumentos financieros propios, como el Banco Obrero Nacional. Su etapa mexicana permanece poco estudiada y sus resultados parciales sugieren un éxito limitado. Un balance sobre el cooperativismo del exilio señala que sobre esta cooperativa se ha escrito poco y documenta que en México fue refundada en 1939 y registrada con domicilio en la calle 5 de Mayo número 10, en el centro de la Ciudad de México (Arias González, 2003; Merino Hernández, 2024; Reyna Fernández, 2020; Reyna Fernández, 2024).

Este artículo recorre la CCBPI como experiencia de urbanización obrera en España y su reaparición en México, a través de tres registros: la bibliografía

del exilio, la historiografía de la arquitectura moderna en México y la prensa lagunera entre 1941 y 1944. Ese cruce perfila su presencia institucional, sus redes y su crisis. El objetivo del artículo es analizar la CCBPI como institución urbana del exilio republicano, atendiendo a su dimensión social, arquitectónica y territorial, así como a los límites que encontró su adaptación en México (Del Cueto Ruiz-Funes, 2014; Rosales Mendoza, 2019; Reyna Fernández, 2020).

UN LABORATORIO OBRERO DE URBANIZACIÓN (1926–1936)

La cooperativa nació en un contexto minero-industrial y sindical en el norte de la provincia de Córdoba. En septiembre de 1926 se discutió la posibilidad de crear una cooperativa constructora; se redactó un reglamento; se realizaron campañas de propaganda; se abrieron listas de inscripción con cuota de entrada; y el 2 de diciembre de 1926 quedó constituida la "Cooperativa Obrera de Casas Baratas Pablo Iglesias". Ese relato muestra que la vivienda de clase trabajadora se planteó desde el inicio como una ingeniería social organizada —reglamento, cuotas, propaganda, militancia y acción política— y no como un gesto filantrópico o empresarial (Arias González, 2003; Reyna Fernández, 2024).

Desde sus primeros años, la cooperativa se apoyó en un ensamblaje de actores y recursos difícil de reproducir. Por ejemplo, contó con apoyos económicos en tiempos de la dictadura de Primo de Rivera y en la España republicana, así como con la donación o la venta simbólica de terrenos por parte de la Sociedad Minera y Metalúrgica de Peñarroya, que además colaboró en la urbanización, el abasto de agua potable y la instalación de la luz eléctrica. En términos urbanos, este punto es relevante: la "casa barata" se sostenía en un paquete de suelo e infraestructura, no solo en la obra arquitectónica. La cooperativa funcionaba como urbanizadora y como espacio de militancia (Arias González, 2003; Reyna Fernández, 2024).

La etapa de maduración local se aceleró en 1929, cuando se inauguraron las primeras treinta y ocho viviendas en dos grupos (Cerro Camello y Bonales). Lo relevante no es sólo el número, sino el horizonte que esas obras anunciaban: dichos grupos se presentaron como anticipo de una "gran ciudad-jardín del futuro" compuesta por 1,619 viviendas. El dato representa una aspiración urbanística: la vivienda obrera no se imaginaba como

agregación dispersa o gestión individual, sino como un conjunto planificado, con trama, servicios y participación colectiva (Arias González, 2003; Reyna Fernández, 2024).

Las fuentes también registran luces y sombras en los procesos de la CCBPI, por ejemplo, críticas a la gestión, acusaciones de personalismo y episodios de tensión con la disciplina sindical. Para la historia del hábitat, estas fricciones son informativas: recuerdan que hacer vivienda desde una institución obrera implicaba administrar dinero, contratos, expectativas y alianzas; es decir, atravesar un campo de conflicto donde aparecen la corrupción, la desconfianza y la burocratización. En otras palabras, el cooperativismo habitacional no es una utopía limpia; es una práctica política con costos.

A partir de 1930, la CCBPI emprendió una expansión territorial. Se consolidó una oficina administrativa y se fortaleció la propaganda: el boletín se transformó en un periódico mensual, *Hogar Obrero*, que se publicó hasta febrero de 1938 y luego fue retomado en una versión mexicana. También se buscaron modelos internacionales de gestión; por ejemplo, se siguió con atención lo discutido en el congreso internacional de Viena sobre vivienda obrera. Este detalle es relevante porque muestra que la cooperativa se asumía como parte de un debate arquitectónico, técnico y social transnacional (Arias González, 2003; Reyna Fernández, 2024).

La dimensión urbana del cooperativismo se vuelve aún más tangible al observar sus tareas típicas: lotificación, urbanización, construcción y dotación de servicios. En síntesis, la cooperativa no era un taller de albañilería ni un simple colectivo de gestores; era un aparato para traducir derechos sociales en suelo, hogar y forma urbana de manera concreta.

F. AZORÍN Y LA ARQUITECTURA COOPERATIVA

Si la cooperativa es una urbanización, la pregunta técnico-cultural es: ¿qué tipo de ciudad imaginaba y qué instrumentos arquitectónicos movilizaba? Dos nombres ayudan a ver el problema: Vicente Hernández Rizo, como secretario general, y Francisco Azorín, como arquitecto. Más allá de la personificación, lo que interesa es la articulación entre ideología, técnica y forma. Una tesis doctoral reciente sobre cooperativismo de vivienda se refiere a la CCBPI,

subrayando su expansión por España y los proyectos asociados al ideal de ciudad jardín en diversas ciudades (Merino Hernández, 2024).

En este sentido, el trabajo de Francisco Azorín Izquierdo resulta significativo. En 1935 proyectó la Colonia Pablo Iglesias en Madrid: un conjunto con rasgos de ciudad jardín, formado por una manzana de casas de dos pisos con terraza, espacios de cocina y patio de servicio, además de un jardín. La referencia a la ciudad jardín de Ebenezer Howard no fue un traslado mecánico del modelo británico, pero sí indica un horizonte de baja densidad, cuidado higienista y orden espacial, es decir, una idea de vivienda obrera compatible con la reforma urbana y la transición política.

En esa colonia, además, se discutieron variantes del régimen de propiedad —propiedad colectiva, derecho de superficie y propiedad individual—. El dato importa por una razón metodológica: en el cooperativismo habitacional, la arquitectura depende tanto de la política como del derecho. Una manzana de casas no es sólo un diseño; es una forma de proyectar el acceso, la permanencia y la transmisión. Por ello, cualquier intento de traslado a México enfrentó una dificultad a la vez política y jurídica: ¿cómo se adecuó la CCBPI al corporativismo sindical del México posrevolucionario?, ¿cómo se adaptó el régimen de propiedad a la legislación mexicana?, ¿qué se mantuvo?, ¿qué se perdió y qué se negoció? Desde una perspectiva arquitectónica e histórica, el punto no es atribuir todo a Azorín, sino reconocer que la cooperativa articuló un posicionamiento ideológico con saber técnico. El hogar obrero aparece aquí como una tecnología social: estandariza soluciones, fija umbrales de salubridad, organiza tiempos de participación en la construcción y normaliza el acceso a servicios.

GUERRA, DISOLUCIÓN Y EL PROBLEMA DE LA CONTINUIDAD

La Guerra Civil Española (1936–1939) alteró radicalmente el cooperativismo. Muchas instituciones republicanas fueron disueltas tras el triunfo franquista, y el mundo sindical sufrió persecución. En ese contexto, las organizaciones de vivienda obrera perdieron su base legal y política. Sin embargo, la ruptura no implicó necesariamente la desaparición total de sus redes: parte de sus miembros y dirigentes terminó en el exilio, y allí se reactivaron estrategias de supervivencia colectiva (Reyna Fernández, 2020).

La dictadura franquista reencauzó el asociacionismo y desarticuló buena parte del movimiento sindical republicano, pero el cooperativismo de vivienda no desapareció por completo. Bajo la Ley de Viviendas de Renta Limitada (1954) proliferaron las cooperativas y, desde 1958, comenzaron a agruparse en Uniones Territoriales; en 1961 se aprobaron oficialmente las de Valencia y Madrid, lo que articuló un movimiento sectorial a escala nacional. En el ciclo final del franquismo y de la transición, el cooperativismo de base volvió a ser un campo de disputa política. Según Merino Hernández, a partir de 1976 el socialismo apostó por recrear la Cooperativa de Viviendas Pablo Iglesias, ya adaptada a la Ley General de Cooperativas de 1974, e impulsó promociones en el área de Madrid. Conflictos en algunas adjudicaciones motivaron la intervención del Ministerio de Trabajo en 1987 y el nombramiento de liquidadores, quienes finalmente pusieron fin a la cooperativa en 1990 (Merino Hernández, 2024).

La literatura sobre el exilio republicano en México suele enfatizar las instituciones culturales y educativas, pero el exilio también fue un problema del trabajo y de la economía cotidiana. En ese sentido, la CCBPI figura entre las empresas y asociaciones que intentaron reinsertar capacidades técnicas provenientes del exilio en la economía mexicana. Se ha señalado su vinculación con organismos políticos del exilio republicano, en un contexto de tensiones internas. Además, desde su refundación, se propuso una colaboración con la Unión Nacional Mexicana de Constructores —otra iniciativa del exilio—; sin embargo, dicha cooperación no se concretó por razones ideológicas (Del Cueto Ruiz-Funes, 2014; Rosales Mendoza, 2019).

Estos datos sugieren que la CCBPI no fue, en México, una simple asociación nostálgica; se la pensó como una estructura económica, capaz de generar empleo y administrar fondos. Pero también exhiben un límite: las instituciones de vivienda no se trasladan intactas; se disputan, se fragmentan, se adaptan y se confrontan con la institucionalidad preexistente en el nuevo territorio.

LA CCBPI EN MÉXICO. PRESENCIA PÚBLICA, REDES Y CRISIS (1939–1950)

En México, la CCBPI se reorganizó en 1939 y quedó inscrita en el Registro Cooperativo Nacional. El acuerdo federal que revocó su autorización para

funcionar, publicado en 1950, consigna como domicilio la avenida Madero núm. 2, despacho 307, en Ciudad de México. Ambos datos hablan de una cooperativa que operaba desde el corazón administrativo y comercial de la capital, donde se concentraban los trámites de registro, crédito y contratación. En la memoria del cooperativismo del exilio, la iniciativa mexicana se asocia a Vicente Hernández Rizo y al arquitecto Azorín (Diario Oficial de la Federación, 1950; Reyna Fernández, 2020).

La primera huella regional en Coahuila se observa en La Laguna. El 8 de octubre de 1941, El Siglo de Torreón informó sobre la instalación de una nueva directiva de una cooperativa encargada de colonias obreras (“Nueva directiva de la cooperativa”, 1941). La nota habló de más de quinientos socios activos y ubicó la sección de Gómez Palacio en Juárez 209 Poniente.

Dos años después, la misma fuente informó que el programa seguía vigente en la organización gremial. La nota “Cooperativa de casas para Gómez” defendió el proyecto frente a inconformes y lo dejó en espera de un recurso del Banco de Crédito Urbano. Al mismo tiempo, dejó ver tensiones internas entre los socios (“Cooperativa de casas para Gómez”, 1944).

En septiembre y octubre de 1944, la prensa puso el nombre “Cooperativa Pablo Iglesias” en un registro de escándalo. El Siglo de Torreón informó sobre una estafa por más de tres millones de pesos ligada al Banco Fiduciario de México y describió a una compañía constructora irregular que operaba bajo el nombre de “Pablo Iglesias”, con las detenciones de Vicente Rizo y Ángel Martínez (“Una fabulosa estafa”, 1944). Al día siguiente, el mismo diario trató el caso como “panamá” de la cooperativa, mencionó a más de cuatrocientos afectados y señaló cobros en Gómez Palacio (“El panamá de la sociedad”, 1944).

En clave urbano-arquitectónica, estas piezas permiten ver el tipo de ciudad que estaba en juego. Hablar de colonias y de casas baratas remitía a un paquete de operaciones: elegir y adquirir suelo, trazar calles y manzanas, asegurar el suministro de agua y energía, y proyectar un modelo de vivienda económica, repetible y compatible con el salario del obrero. En La Laguna, la cooperativa aparece asociada a redes sindicales y a una expectativa de crédito que haría posible esa urbanización popular, aunque en el corpus revisado no se cuenta con registros suficientes para afirmar la ejecución de obra habitacional comprobada (“Nueva directiva de la cooperativa”, 1941; “Cooperativa de casas para Gómez”, 1944).

El cierre llegó en 1950. Un acuerdo de la Secretaría de Economía revocó la autorización de la "Sociedad Cooperativa de Consumo de Servicios de Casas Baratas 'Pablo Iglesias', S.C.L." y estableció que dicha sociedad se había disuelto y liquidado de forma irregular. El propio procedimiento de notificación sugiere que el organismo estaba desarticulado: al intentar notificar en febrero de 1950, la autoridad reportó que no fue posible localizar la oficina y, tras la publicación en el Diario Oficial, no se recibió respuesta. Además, se sabe que en el estado de Nuevo León se remataron predios que habían pertenecido a la CCBPI en la década de 1960 (Diario Oficial de la Federación, 1950).

CONCLUSIONES

La trayectoria de la CCBPI muestra que la vivienda obrera puede estudiarse como institución urbana antes que como un simple episodio constructivo. En España, la cooperativa articuló el suelo, la infraestructura, el proyecto, la organización política y las formas de propiedad; en México, esas capacidades intentaron reactivarse en el exilio, pero chocaron con nuevas condiciones jurídicas, financieras y políticas. La hemerografía localizada para La Laguna permite documentar la existencia de redes, propaganda, captación de socios y expectativas de urbanización popular, aunque todavía no permite afirmar, con base documental suficiente, la materialización de colonias obreras atribuibles a la cooperativa. Precisamente por ello, el caso resulta historiográficamente valioso: permite observar cómo una institución del exilio hizo imaginable la ciudad desde la vivienda, aun cuando su eficacia material haya sido limitada o inestable.

REFERENCIAS

Arias González, L. (2003). *Socialismo y vivienda obrera en España (1926–1939) La cooperativa socialista de casas baratas "Pablo Iglesias*. Ediciones Universidad de Salamanca.

Cooperativa de casas para Gómez. (1944, 11 de febrero). *El Siglo de Torreón*.

Del Cueto Ruiz-Funes, J. I. (2014). *Arquitectos españoles exiliados en México*. Bonilla Artigas Editores; Facultad de Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México.

Diario Oficial de la Federación. (1950, 31 de julio). Acuerdo que revoca la autorización que para funcionar fue otorgada a la Sociedad Cooperativa de Consumo de Servicios de Casas Baratas "Pablo Iglesias", S.C.L. *Diario Oficial de la Federación*.

El panamá de la sociedad "Pablo Iglesias" afecta a gomezpalatinos. (1944, 1 de octubre). *El Siglo de Torreón*.

Merino Hernández, S. (2024). *Cooperativa de viviendas: De la experiencia internacional a la realidad en España y su particular concreción en la Comunidad Autónoma del País Vasco* [Tesis doctoral, Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea]. http://hdl.handle.net/10810/69153

Nueva directiva de la cooperativa que se va a encargar de colonias. (1941, 8 de octubre). *El Siglo de Torreón*.

Reyna Fernández, S. (2020). Cooperativismo y empleo en el exilio republicano español. En *XVIII Congreso Internacional de Investigadores en Economía Social y Cooperativa: La economía social, herramienta para el fomento del desarrollo sostenible y la reducción de las desigualdades*. CIRIEC-España. https://ciriec.es/wp-content/uploads/2020/09/COMUN-003-TG-REYNA-ok.pdf

Reyna Fernández, S. (Coord.). (2024). *Cooperativismo y vivienda obrera en España: El caso de la cooperativa obrera para la adquisición de viviendas baratas*. Fundación Francisco Largo Caballero; Editorial Samarcanda.

Rosales Mendoza, J. M. (2019). *La comunidad arquitectónica del exilio español en México: Arquitectos, ingenieros, aparejadores, técnicos y constructores del destierro republicano*. Silla Vacía Editorial.

Una fabulosa estafa de la sociedad "Pablo Iglesias" en todo el país. (1944, 30 de septiembre). *El Siglo de Torreón*.

¿SABES LO QUE HAY DETRÁS DE TU TAZA DE CAFÉ? EL COSTO AMBIENTAL INVISIBLE DEL CAFÉ

DO YOU KNOW WHAT'S BEHIND YOUR CUP OF COFFEE? THE HIDDEN ENVIRONMENTAL COST OF COFFEE

ORTIZ MORELOS, Diana Paola[1]

CHÁVEZ GONZÁLEZ, Mónica Lizeth[1]

AGUILAR GONZÁLEZ, Cristóbal Noé[1]

MARTÍNEZ HERNÁNDEZ, José Luis[1]

LUNA SÁNCHEZ, Karla Alejandra[2]

1. Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila. Saltillo, Coahuila, México.

2. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Coahuila. Arteaga, Coahuila, México.

RESUMEN

La industria del café representa una de las actividades agroindustriales más importantes en el mundo debido a su gran producción, comercialización y consumo. El café es una de las bebidas más consumidas a nivel mundial gracias a sus propiedades estimulantes. Además de ser un producto de gran demanda, constituye una fuente económica importante para los países donde se produce especialmente en regiones de América Latina, África y Asia. Sin embargo, el crecimiento en la industria ha generado impactos ambientales relacionados con la generación de residuos durante el procesamiento del café. Para obtenerlo se generan diferentes subproductos como pulpa, mucílago, cáscara, pergamino, piel plateada y borra de café, los cuales en muchos casos son desechados directamente al suelo y a cuerpos de agua, generando contaminación ambiental. A pesar de estas problemáticas, los residuos tienen potencial de aprovechamiento debido a su composición orgánica y contenido de compuestos bioactivos. Estudios recientes han demostrado que estos subproductos pueden ser aprovechados en la elaboración de productos o materiales de utilidad. Por ello, es necesario desarrollar e implementar estrategias sostenibles que permitan transformar los residuos en materias primas de alto valor, promoviendo así la economía circular y reduciendo el impacto ambiental.

Palabras clave: *café, residuos de café, impacto ambiental, aprovechamiento.*

ABSTRACT

The coffee industry is one of the most important agro-industrial sectors in the world due to its large-scale production, trade, and consumption. Coffee is one of the most widely consumed beverages globally thanks to its stimulating

Correspondencia
monica_chavez@uadec.edu.mx
Fecha de recepción
18 de noviembre de 2025.
Fecha de aceptación
12 de marzo de 2026.

properties. In addition to being a product in high demand, it serves as a major economic source for the countries where it is produced, particularly in regions of Latin America, Africa, and Asia. However, the industry's growth has led to environmental impacts related to waste generation during coffee processing. This process produces various byproducts, such as pulp, mucilage, husk, parchment, silver skin, and coffee grounds, which are often discarded directly onto the ground or into water bodies, causing environmental pollution. Despite these challenges, the waste can be put to good use due to its organic composition and content of bioactive compounds. Recent studies have shown that these byproducts can be utilized in the production of useful products or materials. Therefore, it is necessary to develop and implement sustainable strategies that allow for the transformation of waste into high-value raw materials, thereby promoting the circular economy and reducing environmental impact.

Keywords: *coffee, spent coffee grounds, environmental impact, reuse*

INTRODUCCIÓN

Cada mañana, millones de personas en el mundo sostienen una taza de café sin pensar en todo lo que hay detrás de ella. Para que ese café llegue a nuestras manos, el grano pasa por muchas etapas: se cultiva en el campo, se cosecha, se despulpa, se fermenta, se seca, se procesa, se muele y finalmente se prepara como bebida. Es un proceso largo que requiere mucho trabajo y también el uso de recursos como el agua y la energía.

Pero el café no solo es lo que bebemos. También es importante lo que se genera durante su producción y que casi nunca vemos. En cada etapa del café se generan distintos tipos de residuos y es importante distinguirlos. Durante la producción del grano, en el campo y en su procesamiento, se generan grandes cantidades de subproductos, como la pulpa del fruto, el mucílago y la cáscara o pergamino, que provienen directamente del beneficio del café. En cambio, en la etapa de consumo, es decir, cuando el café se prepara para beberlo, también se generan residuos como la borra o posos de café, que son los residuos sólidos que quedan tras el proceso de filtración al prepararlo. Estos residuos son grandes cantidades de material orgánico que a menudo no se aprovechan y se desechan.

Esto nos lleva a pensar en algunas preguntas importantes: ¿Alguna vez te has preguntado cuántos residuos se generan para que puedas tomar una sola taza de café? o ¿cuántos se producen en todo el mundo cada día? Y aún más importante, ¿qué pasa con esos residuos cuando no se manejan bien? La verdad es que la industria del café no solo tiene impacto en el producto final, sino también en todo lo que se desecha en el camino. Si estos residuos no se tratan adecuadamente, pueden causar problemas como la contaminación del agua y del suelo o incluso afectar al medio ambiente. Por eso es importante empezar a ver el café no solo como una bebida, sino como un proceso completo donde también debemos prestar atención a lo que normalmente se considera "desecho".

LA INDUSTRIA DEL CAFÉ Y EL IMPACTO AMBIENTAL

El café es una de las bebidas más consumidas en todo el mundo. Su popularidad no solo se debe a su sabor y aroma, sino también a que contiene sustancias con efecto estimulante y que, en algunos casos, se han relacionado con posibles beneficios para la salud. Por eso, forma parte de la rutina diaria de millones de personas (Tamilselvan et al., 2024).

Existen diferentes especies de café, pero las dos más importantes a nivel global son *Coffea arabica* y *Coffea canephora*, conocida comúnmente como robusta. Entre ambas, la especie *Arabica* representa aproximadamente el 64 % de la producción mundial, mientras que la Robusta aporta cerca del 35 %. Estas cifras evidencian la enorme importancia económica y agrícola del café, uno de los productos agroalimentarios más relevantes del planeta (Tsigkou et al., 2025).

Brasil es el principal productor y exportador de café a nivel mundial, con una producción aproximada de 55 millones de sacos en 2024. Esta gran escala de producción refleja la alta demanda global y la relevancia del café en el comercio internacional (Voltolini et al., 2025).

En el caso de México, el cultivo de café también desempeña un papel importante en el sector agrícola. Gracias a su diversidad climática y altitudinal, el país cuenta con condiciones ideales para su producción en varias regiones. Entre los principales estados productores destacan Chiapas,

Veracruz y Puebla, que en conjunto concentran cerca del 80 % de la producción nacional (Rodríguez-Flores et al., 2025).

La industria cafetalera representa una actividad económica importante tanto a nivel global como nacional, por lo que también está asociada a la generación de grandes cantidades de residuos a lo largo de su cadena productiva. Estos residuos, si no se gestionan adecuadamente, pueden convertirse en un problema ambiental significativo.

En muchos casos, los métodos tradicionales de eliminación consisten en desechar estos subproductos en vertederos o en sistemas de disposición inadecuados. Esta práctica puede tener consecuencias negativas, ya que los residuos de café contienen materia orgánica y compuestos químicos que, al descomponerse o liberarse al ambiente, pueden afectar la calidad del suelo y del agua. Además, pueden contribuir a la contaminación ambiental si no se les da un tratamiento o un aprovechamiento adecuados (Melikoglu, 2025).

Por esta razón, es importante entender cuánto café se produce y qué pasa con sus residuos, para poder buscar formas más responsables de manejo y avanzar hacia una industria más sostenible y amigable con el medio ambiente.

EL CAFÉ COMO BEBIDA

La bebida más consumida a nivel mundial es el agua, ya que es indispensable para vivir. En segundo lugar, se encuentra el café. Aunque no es necesario para vivir, su consumo es ampliamente extendido, especialmente en países europeos.

¿Sabías que Europa es actualmente la región donde más se consume el café? Especialmente en Finlandia, donde se consumen casi doce kilos de café al año por persona, seguida por Asia con un 25.8 %, en tercer lugar, Norteamérica con un 17.5 % y Sudamérica con un 15.8 % (Centre for the Promotion of Imports from Developing Countries [CBI], s. f.).

Una de las razones principales es que la cultura del consumo del café forma parte de la vida cotidiana de muchas personas. Su consumo se ha consolidado como una práctica social presente en entornos laborales, reuniones y espacios de convivencia.

Otro factor importante son las cafeterías que están en estos países europeos y el centro de comercio que se le da al café, aunque no es un continente productor de café, sí se han convertido en grandes importadores, tostadores y exportadores del café ya procesado (CBI, s. f.).

IMPORTANCIA ECONÓMICA DE LA BEBIDA

El café no solo es la segunda bebida más consumida a nivel mundial, hablando en cuestiones de economía, también se encuentra entre los productos agrícolas más comercializados a nivel internacional, después del petróleo (dos Muchangos et al., 2025). Esta relevancia económica refleja los ingresos que genera su industria, los cuales superan los 200 mil millones al año y es una industria que le da sustento a aproximadamente 25 millones de familias (Melikoglu, 2025).

Países como Brasil, Colombia, México, Indonesia y Etiopía, representan a los principales productores de café en el mundo, aportando de manera significativa al mercado global. Estos países han producido más de 160 millones de sacos de 60 kg de café y esto sigue en aumento (dos Muchangos et al., 2025; Tamilselvan et al., 2024). Es por eso por lo que estudios recientes han demostrado que este mercado seguirá creciendo, estimándose que para 2026 se alcancen valores de 55.98 mil millones de dólares y hasta 73.67 mil millones de dólares en 2031 (Czarniecka-Skubina et al., 2021; Mordor Intelligence, s. f.).

Estas cifras nos demuestran que la producción y consumo del café no se limita a una bebida cotidiana, sino que es de gran importancia para productores, industrias y consumidores de todo el mundo. Pero detrás de esta actividad económica, existe una consecuencia que casi nadie toma en cuenta, que son las grandes cantidades de residuos generados, representando un reto ambiental.

RESIDUOS GENERADOS PARA OBTENER EL GRANO DE CAFÉ

Así como en casa generamos residuos todos los días, en cualquier proceso de producción se generan también. El café no es la excepción; desde el cultivo hasta la taza, que es como lo tomas, se producen distintos residuos.

Los principales productores de café en el mundo son países de África, de Asia y de América Latina, donde se cultiva en aproximadamente en 12.5 millones de fincas y esto sigue creciendo. La Organización Internacional del Café ha señalado que la producción debe crecer un 3 % anual para poder distribuir todo este café en todo el mundo (Tsigkou et al., 2025). Y es aquí en donde entran en juego los residuos, porque este crecimiento no solo implica mayor producción de café, sino también mayor generación de grandes volúmenes de residuos.

Se estima que solo el 5 % del peso total del fruto corresponde al grano que es destinado para su consumo, mientras que el resto, xcmo la pulpa, el mucílago, la cáscara, el pergamino, la piel plateada y la borra de café, son considerados residuos del proceso (Jiménez-Ochoa & Gutiérrez-Guzmán, 2021). Hablemos de los residuos que se generan en cada una de las etapas de producción del café (figura 1.)



Figura 1. Proceso de producción de café
Tomado de Tsigkou et al. (2025).

A partir de esto, es importante comprender el destino de estos residuos tras su procesamiento. Durante muchos años, estos residuos fueron considerados material sin valor económico, por lo que normalmente son desechados a cuerpos de agua o directamente al suelo. La acumulación de estos residuos representa un importante desafío ambiental (Leow et al., 2021). Un manejo incorrecto de

estos residuos puede provocar daños importantes en el suelo y la contaminación del agua. Entre estos daños, se encuentran el uso poco eficiente del suelo, la emisión de CO_2 y la liberación al entorno de compuestos como cafeína, taninos, polifenoles y otras sustancias químicas capaces de afectar negativamente al medio ambiente. Es por eso por lo que se ha buscado la forma de reutilizar estos residuos (Gaidukova et al., 2021).

NECESIDAD DE PLANTEAR ESTRATEGIAS DE APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS GENERADOS

Con lo expuesto hasta ahora, es posible comprender con mayor claridad que el café no solo es una de las bebidas más consumidas en el mundo, sino que también desempeña un papel fundamental en la economía global. Sin embargo, detrás de este consumo existe una realidad que muchas veces no se menciona; la enorme cantidad de residuos que se generan.

Brasil, reconocido como el principal productor de café en el mundo, responsable de cerca del 30 % de la producción global, genera grandes cantidades de residuos que derivan de esta industria (Voltolini et al., 2025).

En México, la situación no es muy diferente. De acuerdo con el reporte Revolución sostenible en la industria cafetalera mexicana, las etapas del procesamiento del café generan grandes cantidades de residuos (Pérez-Montoya & Gamboa-Roblero, 2025). Esto ha despertado el interés en utilizar estos residuos como materia útil, reconsiderándolosno como residuos, sino como subproductos.

En los últimos años, los subproductos de café han comenzado a verse como materiales con gran potencial de aprovechamiento en diferentes sectores, entre los cuales se encuentran el agrícola, alimentario, farmacéutico y cosmético. Diversos estudios han explotado su uso como materias primas para el desarrollo de productos y procesos sostenibles, convirtiéndolos en una alternativa para la reutilización de estos residuos (Gil-Gómez et al., 2024). Por ello, ahora vale la pena enfocarnos en los beneficios y aplicaciones más interesantes que se pueden obtener de los subproductos de la producción del café.

En cuanto a la pulpa de café, diversos estudios han encontrado que contiene compuestos naturales, llamados fenólicos. Estos compuestos son considerados antioxidantes, los cuales ayudan a neutralizar radicales libres, moléculas encargadas de hacernos envejecer y dañar tejidos del cuerpo. Gracias a estos compuestos de la pulpa de café, se ha comenzado a estudiar y a considerarse como un residuo, y como una fuente de antioxidantes naturales, mediante la extracción de estos compuestos para incorporarse en alimentos funcionales, suplementos y otros productos de la industria alimentaria (Cañas et al., 2023; Cruzalegui et al., 2021; Tsigkou et al., 2025).

La cáscara de café es otra de los subproductos que ha comenzado a generar atención por sus posibilidades de aprovechamiento. Se ha identificado que es rica en compuestos fenólicos, además de contener azúcares fermentables, lo que la convierte en un material con gran potencial para diferentes usos. En el ámbito agrícola se ha demostrado que el incorporarla al suelo puede contribuir a la fertilidad de este y además a favorecer prácticas más sostenibles, gracias a su aporte de materia orgánica. En cuanto a la industria alimenticia se han desarrollado harinas ricas en fibra, que puede usarse para elaborar alimentos horneados como pan o galletas (Gil-Gómez et al., 2024; Tamilselvan et al., 2024; Tsigkou et al., 2025).

En cuanto al mucílago y el pergamino, subproductos generados a partir de la producción de café, han despertado interés por su riqueza en compuestos bioactivos para posibles aplicaciones en el área de salud y bienestar. Ya que presentan compuestos fenólicos que se caracterizan por su actividad antioxidante y gracias a estos se han investigado a estos subproductos como ingredientes en productos para el cuidado de la piel. Además de su potencial prebiótico donde se ha abierto la puerta a nuevas aplicaciones relacionadas con el equilibrio de la microbiota y productos con beneficios hacia la salud (Gil-Gómez et al., 2024).

La cascarilla a piel plateada del café es una fina capa que recubre al grano y se obtiene en el proceso de pulido del grano. Este subproducto se caracteriza por contener un elevado poder calorífico, lo que ha permitido su aprovechamiento en diferentes áreas como la producción de energía y la alimentación animal por su contenido también de lípidos, proteínas y fibra. Así mismo la presencia de compuestos bioactivos, la ha llevado a considerarse un potencial nutraceútico, con posibles aplicaciones a la industria alimenticia (Tsigkou et al., 2025).

La borra de café es un subproducto que se genera después de la preparación de la bebida, es considerado una materia sólida con una composición bromatológica variada donde predominan componentes fibrosos como celulosa, hemicelulosa y lignina, además de pequeñas cantidades de proteínas y lípidos provenientes del grano original. Así mismo contiene compuestos de interés como aceites y antioxidantes lo que le otorga un gran potencial para distintas aplicaciones y lo convierten en una materia prima valiosa (Calheiros et al., 2023; Melikoglu, 2025).

Con esta información puede dejarse ver las amplias oportunidades de uso de estos materiales, aunque se conoce la composición química es necesario realizar estudios puntuales sobre las estrategias de extracción, recuperación y escalamiento de los posibles compuestos de interés. El desarrollo de plataformas extractivas considerando un análisis tecnoeconòmico permitirá ver con claridad las oportunidades de aprovechamiento y generación de sistemas productivos bajo un concepto de economía circular.

CONCLUSIONES

De esta manera aquello que antes terminaba contaminando suelo y agua comienza a verse como una oportunidad para impulsar alternativas sostenibles y amigables con el medio ambiente. Este cambio de enfoque deja de verlos únicamente como residuos y comienza a reconocerlos como subproductos con potencial de aprovechamiento, los cuales se relacionan directamente con la economía circular, donde los materiales pueden reintegrarse a nuevos ciclos de producción, en lugar de desecharse.

Además, el uso de estos subproductos representa un doble beneficio: ya que impulsa la generación de materiales y recursos con valor agregado y, por otro, contribuye al cuidado del medio ambiente mediante prácticas más sostenibles y responsables.

REFERENCIAS

Calheiros, D., Dias, M. I., Calhelha, R. C., Barros, L., Ferreira, I. C. F. R., Fernandes, C., & Gonçalves, T. (2023). Antifungal activity of spent coffee ground extracts. *Microorganisms, 11*(2), 242. https://doi.org/10.3390/microorganisms11020242

Cañas, S., Rebollo-Hernanz, M., Martín-Trueba, M., Braojos, C., Gil-Ramírez, A., Benítez, V., Martín-Cabrejas, M. A., & Aguilera, Y. (2023). Exploring the potential of phenolic compounds from the coffee pulp in preventing cellular oxidative stress after in vitro digestion. *Food Research International, 172*, 113116. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113116

Centre for the Promotion of Imports from Developing Countries. (s. f.). *What is the demand for coffee on the European market?* Retrieved May 20, 2026, from https://www.cbi.eu/market-information/coffee/what-demand

Cruzalegui, R. J., Güivin, O., Fernández-Jeri, A. B., & Cruz, R. (2021). Caracterización de compuestos fenólicos y actividad antioxidante de pulpa de café (Coffea arabica L.) deshidratada de tres fincas cafeteras de la región Amazonas (Perú). *Información Tecnológica, 32*(5), 157–166. https://doi.org/10.4067/S0718-07642021000500157

Czarniecka-Skubina, E., Pielak, M., Sałek, P., Korzeniowska-Ginter, R., & Owczarek, T. (2021). Consumer choices and habits related to coffee consumption by Poles. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 18*(8), 3948. https://doi.org/10.3390/ijerph18083948

dos Muchangos, L. S., Mejia, C., Gupta, R., Sadreghazi, S., & Kajikawa, Y. (2025). A systematic review of life cycle assessment and environmental footprint for the global coffee value chain. *Environmental Impact Assessment Review, 111*, 107740. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107740

Gaidukova, G., Platnieks, O., Aunins, A., Barkane, A., Ingrao, C., & Gaidukovs, S. (2021). Spent coffee waste as a renewable source for the production of sustainable poly(butylene succinate) biocomposites from a circular economy perspective. *RSC Advances, 11*(30), 18580–18589. https://doi.org/10.1039/D1RA03203H

Gil-Gómez, J. A., Florez-Pardo, L. M., & Leguizamón-Vargas, Y. C. (2024). Valorization of coffee by-products in the industry, a vision towards circular economy. *Discover Applied Sciences, 6*(9), 480. https://doi.org/10.1007/s42452-024-06085-9

Jiménez-Ochoa, J. P., & Gutiérrez-Guzmán, N. (2021). Llamado a realizar un adecuado uso de los subproductos del café. *Revista Erasmus Semilleros de Investigación*, número extraordinario, 45–49. https://doi.org/10.25054/2590759X.3440

Leow, Y., Yew, P. Y. M., Chee, P. L., Loh, X. J., & Kai, D. (2021). Recycling of spent coffee grounds for useful extracts and green composites. *RSC Advances, 11*(5), 2682–2692. https://doi.org/10.1039/D0RA09379C

Melikoglu, M. (2025). Coffee waste valorization: A comprehensive review of recent advancements and future directions for a circular bioeconomy. *Food Chemistry, 497*, 147004. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.147004

Mordor Intelligence. (s. f.). *Mercado del café en Europa: Análisis de tamaño y participación*. Retrieved May 20, 2026, from https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/europe-coffee-market

Pérez-Montoya, L. M., & Gamboa-Roblero, F. (2025). *Revolución sostenible en la industria cafetalera mexicana*. Conexión Cinvestav. https://conexion.cinvestav.mx/Publicaciones/revoluci243n-sostenible-en-la-industria-cafetalera-mexicana

Rodríguez-Flores, Z. E., San-Martín-Hernández, C., Morales-Ramos, V., Volke-Haller, V. H., Padilla-Cuevas, J., & Hernández-Gómez, C. (2025). Coffee farming in the Sierra Norte region of Puebla, Mexico: A multivariate analysis approach to productive dedication. *Agriculture, 15*(21), 2192. https://doi.org/10.3390/agriculture15212192

Tamilselvan, K., Sundarajan, S., Ramakrishna, S., Amirul, A. A. A., & Vigneswari, S. (2024). Sustainable valorisation of coffee husk into value added product in the context of circular bioeconomy: Exploring potential biomass-based value webs. *Food and Bioproducts Processing, 145*, 187–202. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2024.03.008

Tsigkou, K., Demissie, B. A., Hashim, S., Ghofrani-Isfahani, P., Thomas, R., Mapinga, K. F., Kassahun, S. K., & Angelidaki, I. (2025). Coffee processing waste: Unlocking opportunities for sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 210*, 115263. https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115263

Voltolini, G. B., Carvalho, G. R., Andrade, V. T., Ferreira, A. D., Raposo, F. V., Carvalho, J. P. F., Vilela, D. J. M., da Silva, C. A., Costa, J. de O., Abreu, G. B., Abrahão, J. C. de R., Botelho, C. E., Nadaleti, D. H. S., Malta, M. R., Silva, V. A., Salgado, S. M. de L., de Faria, R. S., de Oliveira, A. C. B., & Pereira, A. A. (2025). Agronomic performance of irrigated and rainfed Arabica coffee cultivars in the Cerrado Mineiro region. *Agronomy, 15*(1), 222. https://doi.org/10.3390/agronomy15010222

DEL TÉ FERMENTADO AL BIOMATERIAL DEL FUTURO: LA CELULOSA ESCONDIDA EN LA KOMBUCHA

FROM FERMENTED TEA TO THE BIOMATERIAL OF THE FUTURE: THE CELLULOSE HIDDEN IN KOMBUCHA

CHANTRE LÓPEZ, Adriana Rocío[1]

FLORES GALLEGOS, Adriana Carolina[1]

RODRÍGUEZ HERRERA, Raúl[1]

ILINA, Anna[1]

ESPARZA GONZÁLEZ, Sandra Cecilia[2]

ROA ACOSTA, Diego Fernando[3]

RAMOS GONZÁLEZ, Rodolfo[4]

1. Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila. Saltillo, Coahuila, México.

2. Facultad de Odontología, Universidad Autónoma de Coahuila. Saltillo, Coahuila, México.

3. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad del Cauca. Popayán, Cauca, Colombia.

4. SECIHTI-Universidad Autónoma de Coahuila. Saltillo, Coahuila, México.

Correspondencia
rodolfo.ramos@uadec.edu.mx
https://orcid.org/0000-0003-0501-907X

Fecha de recepción
20 de marzo de 2026.
Fecha de aceptación
12 de septiembre de 2026.

RESUMEN

La celulosa bacteriana es un biopolímero que ha cobrado importancia por sus propiedades físicas, químicas y estructurales. Sin embargo, su producción a escala industrial presenta problemas principalmente asociados a los elevados costos de los medios de cultivo y al uso de cepas microbianas altamente especializadas. Por otro lado, la creciente producción y consumo de kombucha como bebida fermentada a nivel mundial han generado una cantidad considerable de película gelatinosa. En esta película se muestra un cultivo simbiótico de bacterias y levaduras conocido como SCOBY, en el que se produce un biopolímero llamado celulosa bacteriana. En este sistema, las levaduras inician el proceso, convirtiendo la sacarosa presente en azúcares más simples, que son aprovechados por las bacterias, en particular las bacterias ácido-acéticas. Estos compuestos se utilizan como fuente de energía y de carbono para la producción de celulosa bacteriana mediante enzimas especializadas. Aunque una pequeña fracción de esta película se utiliza en fermentaciones posteriores, la mayor parte se desecha, a pesar de sus propiedades, como la alta cristalinidad, la porosidad y la capacidad de retención de agua. Además, presenta ventajas frente a la celulosa vegetal, que está libre de otros biopolímeros, como la lignina y la hemicelulosa, que requieren tratamientos severos para su eliminación. Así, este subproducto representa una fuente renovable y sostenible con potencial para el desarrollo de diversos materiales y aplicaciones. El presente trabajo busca mostrar la obtención de celulosa bacteriana a partir de una bebida fermentada, como la kombucha, y destacar su aprovechamiento como alternativa alineada con los principios de la economía circular, que promueve la transformación de un subproducto de la fermentación en un material de interés para distintos sectores.

Palabras clave: celulosa bacteriana; kombucha; fermentación; bacterias; levadura.

Este artículo fue sometido a revisión por pares doble ciego

ABSTRACT

Bacterial cellulose is a biopolymer that has gained prominence for its physical, chemical, and structural properties. However, industrial-scale production presents challenges primarily related to the high cost of culture media and the use of highly specialized microbial strains. On the other hand, the increase in the production and consumption of kombucha as a fermented beverage worldwide has generated a considerable amount of gelatinous film. In this film, there is a symbiotic culture of bacteria and yeast known as SCOBY, within which a biopolymer called bacterial cellulose is produced. In this system, the yeast initiates the process by converting sucrose into simpler sugars, which are then utilized by the bacteria, particularly acetic acid bacteria. These compounds serve as sources of energy and carbon for the production of bacterial cellulose by specialized enzymes. Although a small portion of this film is used for subsequent fermentation, most of it is discarded despite its properties, including high crystallinity, porosity, and water retention capacity. Furthermore, it has advantages over plant cellulose in that it is free of other biopolymers, such as lignin and hemicellulose, which require severe treatments to remove. Therefore, this byproduct is a renewable and sustainable resource with potential for the development of various materials and applications. The objective of this study is to demonstrate the production of bacterial cellulose from a fermented beverage, such as kombucha, and to highlight its use as an alternative aligned with the principles of the circular economy, thereby transforming a fermentation byproduct into a material of interest across various sectors.

Keywords: *bacterial cellulose; kombucha; fermentation; bacteria; yeast.*

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la kombucha ha ganado popularidad como bebida fermentada elaborada tradicionalmente a partir de té negro y azúcar. Al finalizar la fermentación, se obtiene una bebida a la que se atribuyen diversas propiedades asociadas a la salud, como actividad antioxidante, antimicrobiana, antidiabética y anticancerígena (Kitwetcharoen et al., 2025). Estos beneficios han impulsado su creciente mercado en distintos países, especialmente en Norteamérica y Europa.

Sin embargo, durante este proceso también se forma una capa gelatinosa en la superficie conocida como SCoBY. Aunque a simple vista parece una sola masa, en realidad es un consorcio de bacterias y levaduras que trabajan en conjunto. Algunas de estas bacterias producen celulosa, "tejiendo" una red microscópica que actúa como soporte estructural y da forma a la capa visible. A pesar de su origen biológico y de su estructura organizada, gran parte de este material se desecha, perdiéndose así la oportunidad de aprovechar un recurso natural de alto valor biotecnológico (Tapias et al., 2023).

Ante este escenario, la celulosa bacteriana ha despertado un gran interés científico por sus propiedades únicas. Su versatilidad permite aplicaciones en campos tan diversos como la industria alimentaria, los materiales avanzados, la biomedicina o la cosmética. Por otro lado, tiene ventajas frente a la celulosa vegetal, que es libre de biopolímeros como la lignina y la hemicelulosa, lo que confiere una mayor capacidad de retención de agua y una mayor resistencia a la tracción.

Además de sus propiedades, la celulosa bacteriana obtenida a partir de kombucha presenta una ventaja adicional en su producción. A diferencia de los procesos convencionales, que suelen depender de microorganismos aislados por su alta capacidad de síntesis y de medios de cultivo de alto costo, este sistema aprovecha una matriz celulósica generada de forma natural durante la fermentación de la bebida (Amarasekara et al., 2024). En este contexto, su aprovechamiento constituye una estrategia clave dentro del enfoque de economía circular, ya que se busca reducir sus desechos y convertirlos en productos de valor.

CELULOSA BACTERIANA

La celulosa bacteriana es un polisacárido lineal compuesto por unidades de glucosa unidas por enlaces glucosídicos β-1,4. Esta estructura es igual a la celulosa vegetal, y ambas son no tóxicas y biodegradables (Liu et al., 2025). Sin embargo, existen diferencias en el proceso de obtención. La celulosa vegetal debe extraerse de las paredes celulares de las plantas mediante procesos severos como tratamientos mecánicos o químicos agresivos. Estos procesos usan soluciones ácidas, como el ácido sulfúrico, o alcalinas, como el hidróxido de sodio, para eliminar sustancias como la pectina, la

hemicelulosa y la lignina. Como resultado, se generan residuos con un impacto ambiental negativo. En contraste, la celulosa bacteriana puede obtenerse de forma directa y pura durante procesos fermentativos, sin necesidad de procesos tan severos (Santhosh et al., 2025).

La celulosa bacteriana es producida por diversas especies de bacterias y luego se libera al exterior, formando una red tridimensional (3D) visible. Esta estructura está compuesta por nanofibrillas ultrafinas visibles a nivel microscópico, unidas entre sí mediante puentes de hidrógeno. Esta estructura le confiere propiedades de interés, entre las cuales destacan la biocompatibilidad, la alta pureza, la resistencia mecánica, la cristalinidad, la estructura porosa y la alta capacidad de retención de agua, en comparación con la celulosa vegetal (Nagano et al., 2025).

La producción de este biopolímero se asocia principalmente con determinados géneros de bacterias ácido-acéticas. Entre ellos, se destaca el género *Komagataeibacter*, conformado por bacterias Gram-negativas, aerobias estrictas y de forma bacilar (Potočnik et al., 2023). Este género ha sido identificado en el SCoBY durante la fermentación de la kombucha y, gracias a su metabolismo, estas bacterias sintetizan y liberan celulosa al medio, formando la película gelatinosa que se observa en la superficie de la bebida.

¿CÓMO SE FORMA LA CELULOSA BACTERIANA EN LA KOMBUCHA?

La kombucha es una bebida que se obtiene de la fermentación de té negro o verde (*Camellia sinensis*) y de sacarosa (azúcar común) como sustrato, mediante un cultivo simbiótico de bacterias y levaduras, comúnmente llamado SCoBY (Symbiotic Culture of Bacteria and Yeast, por sus siglas en inglés). Esta fermentación se produce a temperaturas entre 20 y 30 °C y tarda entre 7 y 15 días (Daus et al., 2025). Como se observa en la figura 1, la producción de kombucha comprende la preparación del medio de cultivo, la inoculación con el SCoBY y la fermentación en condiciones controladas. Estas etapas favorecen la formación de una película de celulosa bacteriana en la superficie de la bebida.

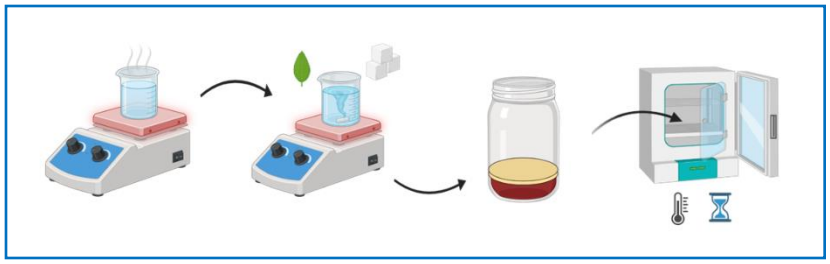


Figura 1. Producción de la kombucha y formación de celulosa bacteriana

El mercado mundial de la kombucha no ha dejado de crecer y se estima que aumente alrededor de un 22 % entre 2022 y 2027 (Dartora et al., 2023). Aunque producirla puede costar menos de un dólar estadounidense por litro, su precio de venta puede alcanzar entre 7 y 9 dólares, lo que convierte el proceso en atractivo. Sin embargo, durante esta fermentación se genera un subproducto poco aprovechado: la película gelatinosa que flota en la superficie, conocida como celulosa bacteriana. Una parte puede utilizarse como inóculo para fermentaciones posteriores, pero debido a la falta de estrategias industriales para su comercialización, con frecuencia se desecha.

Así, la creciente popularidad de la kombucha abre la oportunidad de convertir este subproducto en un recurso, integrándolo en modelos de economía circular en los que nada se desperdicia y todo puede reutilizarse, y convirtiéndolo en un material con potencial de aplicación en diversas áreas, como la biomédica, la alimentaria y la farmacología, entre otras.

En el SCOBY se encuentran bacterias del ácido acético, como *Komagataeibacter* y *Gluconobacter*; bacterias del ácido láctico, como las especies de *Lactobacillus* y *Lactococcus*; y levaduras como *Brettanomyces*, *Saccharomyces* y *Zygosaccharomyces* (Meng et al., 2025). Estos microorganismos trabajan en conjunto; así, la obtención de kombucha se inicia con la fermentación del té endulzado, que presenta una alta disponibilidad de azúcares.

Las levaduras descomponen la sacarosa en dos azúcares más sencillos: glucosa y fructosa mediante la acción de la enzima invertasa (Santiago et al., 2025). Estas moléculas más pequeñas son aprovechadas por las bacterias y las levaduras, convirtiéndolas en otros compuestos, como dióxido de carbono (CO_2), etanol, celulosa bacteriana y ácidos orgánicos, entre los cuales predomina el ácido acético. Este último aporta un sabor ligeramente ácido a la kombucha. Además, durante la fermentación se generan y se transforman

compuestos polifenólicos asociados a posibles beneficios para la salud. Entre ellos, se ha asociado con la prevención o la reducción de factores de riesgo de algunas enfermedades crónicas, aunque la evidencia científica continúa en desarrollo.

Como se mencionó anteriormente, las bacterias ácido-acéticas son conocidas por producir celulosa bacteriana. Estas bacterias actúan como pequeñas fábricas, capaces de transformar azúcares simples en un material estructural con propiedades de interés. Este proceso ocurre a través de las siguientes etapas.

DE LOS AZÚCARES A LOS BLOQUES DE CONSTRUCCIÓN

Todo inicia con la glucosa, el azúcar resultante de la descomposición de la sacarosa en glucosa y fructosa por acción de las levaduras presentes en el SCOBY. Esto es posible gracias a enzimas denominadas invertasas, que catalizan dicha transformación. Una vez liberadas, estas moléculas quedan disponibles para ser utilizadas por las bacterias ácido-acéticas.

TRANSFORMACIÓN DE LA GLUCOSA Y SÍNTESIS DE CELULOSA

Cuando la glucosa ingresa a la célula bacteriana, no se convierte de inmediato en celulosa. Primero debe activarse químicamente mediante una serie de reacciones metabólicas que se llevan a cabo dentro de la célula, permitiendo transformarla a una forma adecuada que luego pueda unirse una con la otra, es decir, convertirse en un bloque de construcción (Zhang et al., 2025). Posteriormente, enzimas ubicadas en la membrana celular, en particular la celulosa sintasa, permiten unir estos bloques uno tras otro, formando largas cadenas lineales de glucosa que constituyen la estructura de la celulosa. Este proceso, que constituye la biosíntesis de este biopolímero, ocurre de manera continua mientras la bacteria disponga de nutrientes y de condiciones adecuadas, como oxígeno y una temperatura óptima (Zhang et al., 2025).

FORMACIÓN DE LA ESTRUCTURA TRIDIMENSIONAL

A diferencia de muchas otras moléculas biológicas que permanecen dentro de la célula, las cadenas de celulosa son expulsadas hacia el exterior a medida que se forman. Una vez fuera, múltiples cadenas comienzan a asociarse entre sí mediante puentes de hidrógeno, organizándose en

microfibrillas ultrafinas. Estas microfibrillas, a su vez, se agrupan en una compleja red tridimensional que da origen a la película gelatinosa característica que flota en la superficie de la kombucha (Zhang et al., 2025).

La orientación y el empaquetamiento de las fibras otorgan al biopolímero una alta cristalinidad y resistencia mecánica, así como una notable capacidad de retención de agua. Además, la estructura nanofibrilar de la celulosa bacteriana es más uniforme y pura que la de la celulosa vegetal, ya que no está asociada a otros biopolímeros, como la lignina y la hemicelulosa, que son componentes estructurales de las plantas.

La producción de celulosa cumple, además, una función biológica para la bacteria. Esta película gelatinosa que se forma actúa como una barrera protectora y facilita el acceso al oxígeno en la superficie del líquido, lo cual es una condición indispensable para estas bacterias aerobias. Así, la biosíntesis de celulosa no solo genera un material con potencial tecnológico, sino que también representa una ventaja competitiva al favorecer la adhesión, la adherencia y la posterior colonización del SCOBY en otros sustratos (Potočnik et al., 2023).

Después de la biosíntesis de la celulosa bacteriana, esta se convierte en la nueva casa del SCoBY. Por ello, se lleva a cabo un proceso de purificación para eliminar estos microorganismos y compuestos, como los polifenoles, ya que pueden afectar sus propiedades fisicoquímicas y estructurales. Como se muestra en la figura 2, la película de celulosa obtenida tras la fermentación es sometida a tratamientos térmicos y varios lavados con soluciones alcalinas diluidas como hidróxido de sodio, seguidos de lavados con agua hasta alcanzar un pH neutro. Este procedimiento permite eliminar las impurezas sin alterar la red tridimensional de nanofibras. Durante la purificación también se observa un cambio visible en el material, que pasa de una tonalidad café/marrón a un color blanco característico de la celulosa (Srivastava & Mathur, 2025). Así, finalmente se convierte en un material con un amplio potencial de aprovechamiento en distintos sectores, extendiendo su utilidad más allá del sistema biológico responsable de su producción.

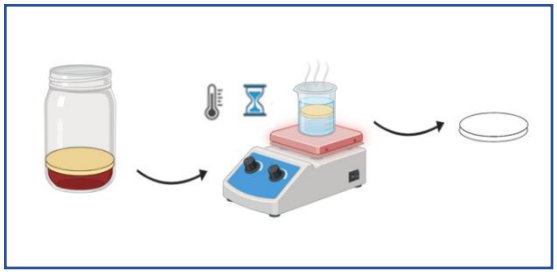


Figura 2. Purificación de la celulosa bacteriana obtenida durante la fermentación de kombucha.

APLICACIONES

Debido a las propiedades de la celulosa bacteriana, esta se ha convertido en un material con potencial en diversos sectores. Como se muestra en la figura 3, sus aplicaciones abarcan áreas como la biomédica, donde puede emplearse en apósitos para heridas y andamios para la regeneración de tejidos; la industria alimentaria; la administración controlada de fármacos; la fabricación de lentes de contacto; el desarrollo de sensores; y el tratamiento de aguas. Así, el mercado de la celulosa bacteriana se valoró en aproximadamente 412 millones de dólares en 2023, con una tasa de crecimiento anual estimada entre 16 y 20 % hasta 2030 (Guevara et al., 2025).

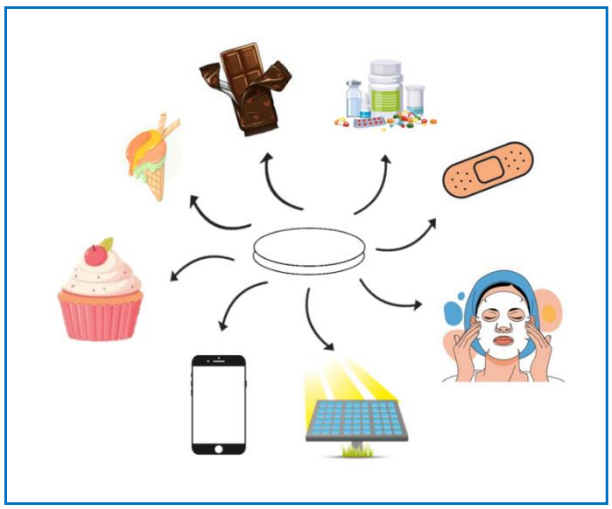


Figura 3. Diversas aplicaciones de la celulosa bacteriana.

Estudios recientes han encontrado que la fabricación de apósitos con celulosa bacteriana aceleró el proceso de cicatrización en pacientes con problemas diabéticos. Debido a que la regeneración del tejido suele ser más lenta y más susceptible a infecciones (Khalid et al., 2026). Este efecto se atribuye, en gran parte, a la elevada capacidad de retención de agua y su estructura porosa. Estas propiedades permiten mantener un ambiente húmedo favorable para la recuperación de la piel, y actúan como barrera física frente a contaminantes externos.

Este biopolímero también mostró propiedades sostenibles y eficaces para la conservación de alimentos. Permitió mantener la calidad del producto y

alargó la vida útil del mismo (Ma et al., 2026), esto debido a la resistencia que presenta. También se ha utilizado como material adsorbente de metales pesados en el tratamiento de aguas residuales. Los resultados fueron positivos debido a su estructura microporosa (Konjevod et al., 2025). Esta propiedad puede convertirse en una estrategia para el tratamiento de efluentes industriales, particularmente en regiones donde la contaminación por metales representa un riesgo para la salud y los ecosistemas.

Asimismo, la versatilidad estructural de este biopolímero ha permitido su aplicación como sistema de protección y de liberación controlada de compuestos bioactivos. Muchos de estos compuestos son sensibles a factores externos, como la luz, el oxígeno y la temperatura, lo que puede afectar su estabilidad. Diversos compuestos de origen vegetal han sido ampliamente estudiados por sus propiedades antioxidantes y su posible relación con la reducción de factores de riesgo asociados a ciertas enfermedades crónicas. En este contexto, la celulosa bacteriana contribuye a proteger estos compuestos, favoreciendo la conservación de sus propiedades durante su almacenamiento o su incorporación en distintos productos.

En el sector alimentario también se han explorado diversas aplicaciones de la celulosa bacteriana. Por ejemplo, se ha evaluado como suplemento dietético en modelos animales alimentados con dietas ricas en grasas, en los que se han observado efectos asociados a la disminución de los niveles de colesterol, lo que ha despertado interés en su posible uso como fuente de fibra dietética (Nagano et al., 2025). De igual forma, se ha utilizado la celulosa bacteriana como ingrediente para la fabricación de helado, encontrando mejoras en la viscosidad y la textura, además de un efecto probiótico, sin afectar las características sensoriales (Mehta et al., 2024). Estas aplicaciones se han logrado, además, gracias al reconocimiento como sustancia segura por parte de la Administración de Alimentos y Medicamentos de los EE. UU. (FDA) desde 1992.

CONCLUSIONES

La celulosa bacteriana obtenida a partir de la kombucha evidencia el valor que pueden alcanzar algunos subproductos de la fermentación cuando se aprovechan adecuadamente. Durante muchos años, esta película gelatinosa que se formaba en la superficie de la bebida fermentada fue desechada, ya

que el principal interés era el consumo de la bebida. Sin embargo, este "desecho" ha mostrado características únicas que pueden aprovecharse en distintos ámbitos.

Su obtención mediante un proceso natural de fermentación la convierte en una alternativa interesante dentro de las estrategias de sostenibilidad y de economía circular. En este sentido, la valorización de esta matriz contribuye a un uso más eficiente de los recursos y amplía las posibilidades de aplicación innovadora. Así, la celulosa bacteriana, más allá de ser otro producto de la fermentación, invita a considerar los bioprocesos desde otra perspectiva: no solo como una forma de obtener un alimento o un producto principal, sino también como sistemas capaces de generar materiales sostenibles.

REFERENCIAS

Amarasekara, A., Shrestha, B., & Wang, D. (2024). Chemical modifications of kombucha SCOBY bacterial cellulose films by citrate and carbamate cross-linking. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 8, 100595. https://doi.org/10.1016/j.carpta.2024.100595

Dartora, B., Hickert, L., Fabricio, M., Ayub, M., Furlan, J., Wagner, R., Perez, K., & Sant'Anna, V. (2023). Understanding the effect of fermentation time on physicochemical characteristics, sensory attributes, and volatile compounds in green tea kombucha. *Food Research International*, 174, 113569. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113569

Daus, F., Montroni, D., Pesavento, L., Bruschi, M., Liguori, A., & Focarete, M. L. (2025). Influence of the thickness of symbiotic culture of bacteria and yeast on purification and final properties of bacterial cellulose. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 9, 100645. https://doi.org/10.1016/j.carpta.2024.100645

Guevara, K., Martínez, G., Sánchez, V., Guerrero, K., & Fiallos, M. (2025). Trends and perspectives on bacterial nanocellulose: A comprehensive analysis from the three helixes of innovation. *Materials Today Sustainability*, 30, 101090. https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2025.101090

Khalid, A., Khan, T., Wang, H., Said, A., Madni, A., Khan, S., Khalid, A., Islam, M., Ayub, H., Hassan, A., Haghniaz, R., & Wahid, F. (2026). In vivo and molecular analysis of bacterial cellulose incorporated graphene oxide for diabetic wound healing. *Materials Today Communications*, 51, 114693. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2026.114693

Kitwetcharoen, H., Chamnipa, N., Thanonkeo, S., Klanrit, P., Tippayawat, P., Klanrit, P., Klanrit, P., Yamada, M., & Thanonkeo, P. (2025). Enhancing kombucha functionality: Utilizing dried pineapple peels and cores as an alternative ingredient for improved antioxidant and antimicrobial properties. *LWT*, 216, 117358. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2025.117358

Konjevod, M., Alonso, R., Taha, A., Lanceros, S., & Sáiz, J. (2025). Zero-waste valorization of agricultural products: The model case of mixed fermentation in kombucha. *Environmental Challenges*, 20, 101225. https://doi.org/10.1016/j.envc.2025.101225

Liu, S., Luo, J., Shi, Y., & Chen, Q. (2025). Unlocking the potential of *Komagataeibacter europaeus* FMES: A novel source of bacterial cellulose from *Monascus vinegar* biofilm. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 10, 100841. https://doi.org/10.1016/j.carpta.2025.100841

Ma, L., Hu, P., Zhang, Y., Dai, Y., & Guo, Y. (2026). The preparation and physicochemical properties of biodegradable konjac glucomannan-based films reinforced with bacterial cellulose and tea polyphenol for food packaging. *RSC Advances*, 16(1), 370–382. https://doi.org/10.1039/D5RA07243C

Mehta, A., Kumar, L., Serventi, L., Morton, J., & Torrico, D. (2024). Bacterial cellulose infusion: A comprehensive investigation into textural, tribological and temporal sensory evaluation of ice creams. *International Journal of Biological Macromolecules*, 281, 136510. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.136510

Meng, Q., Jiang, Y., Rogiewicz, A., & Hu, J. (2025). A sustainable strategy for biosynthesis of bacterial cellulose using a microbial symbiotic culture from hemp (*Cannabis sativa* L.) waste hydrolysate. *Industrial Crops and Products*, 234, 121509. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121509

Nagano, T., Pambu, A., Higashimura, Y., Nakano, M., & Nishiuchi, T. (2025). Dietary bacterial cellulose modulates gut microbiota and increases bile acid excretion in high-fat diet-induced obese mice. *Food Hydrocolloids for Health*, 7, 100213. https://doi.org/10.1016/j.fhfh.2025.100213

Potočnik, V., Gorgieva, S., & Trček, J. (2023). From nature to lab: Sustainable bacterial cellulose production and modification with synthetic biology. *Polymers*, 15(16), 3466. https://doi.org/10.3390/polym15163466

Santhosh, I., Singh, S., Holla, S., & Selvaraj, S. (2025). Pyrethroid pesticide detection and bioactivity evaluation of microbial cellulose derived from food waste. *Food Chemistry Advances*, 8, 101031. https://doi.org/10.1016/j.focha.2025.101031

Santiago, R., Michel, M., Rodríguez, R., Aguilar, P., Ascacio, J., & Flores, A. (2025). Symbiotic culture of bacteria and yeast (SCOBY) in the food sector as a source of polysaccharides and other applications in the food sector. *Polysaccharides*, 6(4), 97. https://doi.org/10.3390/polysaccharides6040097

Srivastava, S., & Mathur, G. (2025). Investigating the effect of alkali treatment on physicochemical characteristics of bacterial cellulose synthesized by *Komagataeibacter saccharivorans* BC-G1. *Microbe*, 7, 100340. https://doi.org/10.1016/j.microb.2025.100340

Tapias, Y., Monte, M., Peltzer, M., & Salvay, A. (2023). Kombucha fermentation in yerba mate: Cellulose production, films formulation and its characterisation. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 5, 100310. https://doi.org/10.1016/j.carpta.2023.100310

Zhang, Y., Sun, D., & Xu, L. (2025). Bacterial cellulose-driven sustainable food packaging innovations: Biosynthesis, functionalization, and applications. *Trends in Food Science & Technology*, 163, 105167. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2025.105167

SCOBY: DEL CULTIVO SIMBIÓTICO A LOS ALIMENTOS FUNCIONALES Y LOS MATERIALES AVANZADOS

SCOBY: FROM SYMBIOTIC CULTURE TO FUNCTIONAL FOODS AND ADVANCED MATERIALS

SANTIAGO SANTIAGO, Rosa María[1]

MICHEL MICHEL, Mariela Ramona[1]

RODRÍGUEZ HERRERA, Raúl[1]

RAMOS GONZÁLEZ, Rodolfo[1]

GOVEA SALAS, Mayela[1]

AGUILAR ZÁRATE, Pedro[2]

FLORES GALLEGOS, Adriana Carolina[1]

RESUMEN

El SCOBY (*Symbiotic Culture of Bacteria and Yeast*) es el consorcio microbiano responsable de producir una de las bebidas fermentadas más consumidas en el mercado, gracias a un complejo ecosistema que transforma azúcares y tés. Este bioproceso se lleva a cabo por acción de levaduras (*Saccharomyces, Zygosaccharomyces*, etc.), bacterias acéticas (*Komagataeibacter, Acetobacter, Gluconobacter*, etc.) y bacterias lácticas (*Lactobacillus, Pediococcus*, etc.). La bebida kombucha aporta múltiples beneficios a nuestro organismo al contener probióticos, ácidos orgánicos, compuestos bioactivos, vitaminas y minerales. Durante el proceso, la fermentación produce simultáneamente un nuevo SCOBY que puede emplearse para fermentar otra bebida si se hace de manera adecuada; sin embargo, la producción de este subproducto no se detiene y continúa creciendo de forma constante, lo que permite aprovecharlo ampliamente. Diversas investigaciones han analizado el SCOBY y han demostrado que es una excelente fuente de celulosa. La celulosa bacteriana es un polímero de gran interés que, al ser purificada, adquiere características como alta cristalinidad y pureza, una estructura de nanofibrillas altamente organizada, elevada resistencia mecánica y una capacidad de retención de agua excepcional. Estas propiedades, sumadas a su adaptabilidad a mejoras mediante diversos procesos, permiten su aplicación en sectores estratégicos que abarcan desde la industria alimentaria hasta la ingeniería. En el presente documento se explica cómo este bioproceso trabaja en armonía para producir compuestos bioactivos y a su vez producir un material sustentable, adaptable y altamente resistente con un gran campo de aplicación.

Palabras clave: SCOBY; celulosa bacteriana; valorización de subproductos.

1. Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila. Saltillo, Coahuila, México.

2. Instituto Tecnológico de Ciudad Valles, Instituto Tecnológico Nacional. Ciudad Valles, San Luis Potosí, México.

Correspondencia
adrianaflores@uadec.edu.mx
https://orcid.org/0000-0001-5092-1404

Fecha de recepción
13 de abril de 2026.
Fecha de aceptación
25 de septiembre de 2026.

Este artículo fue sometido a revisión por pares doble ciego

ABSTRACT

SCOBY (Symbiotic Culture of Bacteria and Yeast) is the microbial consortium responsible for producing one of the most widely consumed fermented beverages on the market, utilizing a complex microbial ecosystem that transforms sugars and teas. This bioprocess is carried out through the action of yeasts (Saccharomyces, Zygosaccharomyces, etc.), acetic acid bacteria (Komagataeibacter, Acetobacter, Gluconobacter, etc.), as well as lactic acid bacteria (Lactobacillus, Pediococcus, etc.). The kombucha beverage provides multiple health benefits due to its content of probiotics, organic acids, bioactive compounds, vitamins, and minerals. During this process, fermentation simultaneously produces a new SCOBY that can be utilized to ferment a subsequent batch if managed properly; however, the generation of this by-product does not cease and continues to grow steadily, allowing for its extensive utilization. Various studies have analyzed SCOBY and discovered that it constitutes an excellent source of cellulose. Bacterial cellulose is a polymer of significant interest which, upon purification, acquires characteristics such as high crystallinity and purity, a highly organized nanofibrillar structure, elevated mechanical strength, and an exceptional water-holding capacity. These properties, combined with its adaptability to modifications through various processes, enable its application across strategic sectors ranging from the food industry to engineering. This document elucidates how this bioprocess yields bioactive compounds while simultaneously producing a sustainable, adaptable, and highly resilient material with a broad scope of application.

Keywords: *SCOBY; bacterial cellulose; By-product valorization.*

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la población enfrenta numerosos desafíos, como la búsqueda de alimentos que aporten beneficios adicionales, por lo que se han desarrollado los llamados alimentos funcionales, que contienen componentes biológicamente activos que otorgan propiedades específicas para la salud gracias a su contenido de fibra, probióticos o compuestos bioactivos. Por otro lado, existe la necesidad de encontrar nuevas fuentes de materiales avanzados que cumplan con estándares de calidad, sin generar un impacto ambiental negativo ni un costo elevado en su obtención. En este contexto, la fermentación con SCOBY, utilizada tradicionalmente para elaborar kombucha

a base de té negro y sacarosa, juega un papel importante. Actualmente es uno de los bioprocesos más llamativos y abarca dos áreas importantes: los alimentos y los materiales. Por un lado, genera una bebida funcional rica en antioxidantes y microorganismos benéficos; por otro, también se produce una capa superficial compuesta por una red de nanofibrillas que forma un nuevo SCOBY, que, más allá de ser un nuevo cultivo iniciador, se considera una fuente de celulosa bacteriana (Kitwetcharoen et al., 2023).

La investigación sobre sustratos alternativos para optimizar este proceso ha despertado un gran interés científico. Más allá de la receta tradicional, hoy en día se han obtenido bebidas mediante la valorización de residuos o subproductos agroindustriales, lo que permite transformarlos en un nuevo sustrato (Su et al., 2023). La importancia del estudio de los sustratos alternativos radica en la variabilidad de los subproductos obtenidos, ya que, al diversificar la fuente de nitrógeno, cambian los compuestos y las propiedades tecno-funcionales de la celulosa bacteriana producida (Gomes Soares et al., 2021). Por consiguiente, en este proceso también se atiende la reducción del impacto ambiental derivado de los desechos alimentarios.

Hasta ahora los estudios que se han realizado en torno a la optimización de las fermentaciones con SCOBY han sido prometedores, expandiendo las posibilidades, sin embargo, aún quedan muchos retos por abordar; tal es el caso de la estandarización del proceso, ya que, siendo un ecosistema vivo, difícilmente se podría estandarizar el resultado de estas fermentaciones debido a la alta diversidad microbiológica presente, que conlleva la obtención de materiales similares pero no idénticos. A pesar de ello, queda claro que este proceso fermentativo representa una alternativa eficiente que aborda diversas problemáticas, lo que subraya su versatilidad. Por lo anterior, este artículo tiene como objetivo presentar los aspectos más relevantes de esta fermentación y sus aplicaciones más destacadas en diversos campos de la ciencia y la industria.

¿QUÉ ES EL HONGO QUE FLOTA SOBRE LA KOMBUCHA?

El SCOBY (Symbiotic Culture of Bacteria and Yeast) es un consorcio simbiótico de bacterias y levaduras, mejor conocido como "hongo" por su apariencia gelatinosa, aunado a su presencia en un líquido en fermentación. Este

consorcio es un ecosistema vivo que utiliza té negro y azúcar para producir la conocida "kombucha", una bebida consumida a nivel mundial por sus múltiples beneficios. Dicho proceso se inicia con las levaduras (microorganismos unicelulares que descomponen azúcares), encargadas de transformar el azúcar presente en glucosa y fructosa, así como en etanol (alcohol); no obstante, este último se presenta en una proporción muy baja, por lo que no se considera una fermentación alcohólica (Antolak et al., 2021). Al mismo tiempo, las bacterias acéticas (que convierten el alcohol en ácido acético) utilizan la glucosa y el etanol para producir ácido acético, por lo que las fermentaciones que emplean este consorcio simbiótico adquieren un sabor ligeramente ácido y también evitan la contaminación por algunos patógenos.

En este bioproceso se comienza a formar una capa, producida por las bacterias acéticas: el SCOBY (siglas en inglés de "Symbiotic Culture of Bacteria and Yeast", es decir, cultivo simbiótico de bacterias y levaduras). A través de un proceso de polimerización (unión controlada de moléculas para formar cadenas largas), se unen cadenas de glucano, un polisacárido, hasta formar el llamado “hongo”; esta capa, además, actúa como protector del medio líquido. Otros microorganismos que forman parte de este bioproceso son las bacterias ácido-lácticas (BAL, que convierten los azúcares en ácido láctico), que favorecen la formación de un ambiente idóneo para el resto de los microorganismos y aportan uno de los mayores beneficios de esta fermentación: el contenido de probióticos (microorganismos vivos que benefician la salud digestiva).

Aunque originalmente el SCOBY se utiliza para producir kombucha, se han realizado múltiples investigaciones que emplean diferentes fuentes de hidrógeno y de carbono. Esto ha permitido el uso de sustratos poco convencionales como desechos industriales, frutas tropicales o poco valoradas, cactáceas y especias, entre otros (Mat Zin Boestami et al., 2024). Pese a esta diversidad, la sacarosa sigue siendo la fuente de carbono más eficiente, como lo han reportado múltiples autores por su bajo costo y alto rendimiento.

Para que esta fermentación se lleve a cabo correctamente, existen condiciones específicas:

- Un pH entre 2.5 y 3.5.
- Una temperatura de 37 °C.
- Un periodo máximo de 21 días.

Una vez cumplidos estos puntos, la fermentación se desarrollará de manera óptima. Dichas bebidas ya se encuentran en el mercado debido a su producción a escala mundial y a su alta diversificación; sin embargo, cabe aclarar que producirlas en casa también es un proceso fácil y rápido (Dartora et al., 2023).

El nivel de adaptación del SCOBY es tan elevado que el uso de distintos sustratos ha ampliado significativamente los beneficios de esta bebida. Al ser una bebida elaborada a partir de un cultivo simbiótico, aporta los beneficios de los probióticos. Los probióticos son BAL que ayudan a regular la microbiota intestinal. Estas bacterias se encuentran de forma natural en nuestro sistema digestivo y son responsables de mantener el equilibrio, regulando procesos como la digestión, la inflamación y las enfermedades cardiovasculares. Por otro lado, también se puede considerar un prebiótico, al promover la supervivencia de las bacterias lácticas, reduciendo así el riesgo de enfermedades y fortaleciendo el sistema inmune (Harrison & Curtin, 2021). Otro de los beneficios indiscutibles de esta bebida es la presencia de compuestos bioactivos. El uso de diferentes sustratos, como se mencionó anteriormente, amplía la diversidad y la cantidad de dichos compuestos. Estos compuestos, principalmente polifenoles presentan actividad antioxidante que interactúan con las especies reactivas de oxígeno, que causan el estrés oxidativo, el cual, a su vez, se asocia al desarrolla de diversas patologías. En la literatura, estos metabolitos son coadyuvantes en el tratamiento de diversas enfermedades debido a sus propiedades antimicrobianas y antidiabéticas, así como a sus potenciales efectos antiproliferativos (Tejedor-Calvo & Morales, 2023). Entre los mayores beneficios de estas fermentaciones está la producción de ácidos orgánicos, que, además de regular el pH en el bioproceso, contribuyen a la salud al proveer energía, regular el sistema inmune y aportar un sabor atractivo a las bebidas. Asimismo, algunas investigaciones sugieren que ciertos ácidos orgánicos podrían contribuir a la salud ósea al favorecer un ambiente intestinal óptimo y la absorción de minerales como el calcio mediante la modulación de las hormonas gastrointestinales. Por último, mediante esta fermentación se pueden liberar vitaminas y minerales que, dependiendo del sustrato, pueden regular la presión arterial, la producción de energía y asegurar el funcionamiento adecuado del sistema inmunitario (Shi et al., 2022). Finalmente, el medio resultante de esta fermentación, debido a la combinación de sustratos y microorganismos, es un excelente productor de celulosa bacteriana. Aunque el SCOBY impulsa la fermentación, tras su procesamiento y purificación, solo

quedan microfibrillas de celulosa. A diferencia de la celulosa de origen vegetal, la celulosa bacteriana se sintetiza libre de matrices complejas como la lignina, la hemicelulosa y la pectina, lo que da como resultado un polímero caracterizado por su alta pureza estructural desde su obtención (Girard et al., 2024).

DEL FRASCO A LA INDUSTRIA DE MATERIALES

¿Por qué es importante mencionar la producción de celulosa bacteriana en esta fermentación? Existe un concepto fundamental llamado economía circular, que busca aprovechar los residuos generados en cada proceso desde el inicio hasta el final. En este caso, una vez iniciada la fermentación, el plazo máximo para obtener la bebida es de 21 días. Sin embargo, incluso después de ese lapso, la producción de celulosa continúa siendo un subproducto muy valioso que puede aprovecharse como cultivo iniciador y como materia prima con diversas aplicaciones (Almeida et al., 2024).

La celulosa bacteriana producida por el SCOBY es más económica y respetuosa con el medio ambiente, ya que el proceso no emplea agentes químicos agresivos, a diferencia de la celulosa vegetal (Cruz et al., 2024). Además, al secarse, se obtiene un material de excelente textura y resistencia con aplicaciones prometedoras. Existen diferentes tipos de celulosa según el tratamiento de purificación aplicado, lo que puede incrementar la resistencia del material. Además, la celulosa presenta características sobresalientes como alta pureza (bajo contenido de impurezas), alto grado de cristalinidad (orden en la disposición de las moléculas de glucosa), resistencia a la degradación a altas temperaturas, gran maleabilidad (facilidad para moldearse) y una estructura porosa que permite el paso de oxígeno y de moléculas complejas (como proteínas o enzimas).

Asimismo, se ha comprobado que este material es biocompatible (no genera rechazo en organismos vivos), no tóxico y presenta una alta versatilidad debido a su naturaleza (Alvarado-Rojas et al., 2024).

APLICACIONES DE LA CELULOSA BACTERIANA

Como se ha mencionado, la celulosa bacteriana es un subproducto de la fermentación que, en ocasiones, carece de valor comercial. Sin embargo,

algunos estudios han demostrado que tiene un amplio campo de aplicación. En el caso particular de alimentos, se utiliza como ingrediente alimentario, aportando fibra dietética o como sustituto de grasa; adicionalmente, como recubrimiento comestible, texturizante, encapsulante, emulsionante y/o estabilizante, entre otros (Flores Valencia & Flores Totora, 2024). En el sector industrial, destaca su uso en el sector textil para la fabricación de bolsos, carteras, ropa y accesorios, mientras que, en el sector electrónico, se emplea en diafragmas acústicos y como estructura que permite la conductividad eléctrica al formar parte de diversos dispositivos. Una de las áreas de mayor interés en este polímero es la medicina, ya que se ha utilizado como sustituto de piel en modelos *in vivo*, con excelentes resultados. Su alta compatibilidad se debe a su porosidad, que permite retener una mayor cantidad de agua en comparación con los apósitos sintéticos; además, puede emplearse en andamios (*scaffolds*), donde las células madre pueden proliferar, y en sistemas de liberación de fármacos (Nam et al., 2025; figura 1).

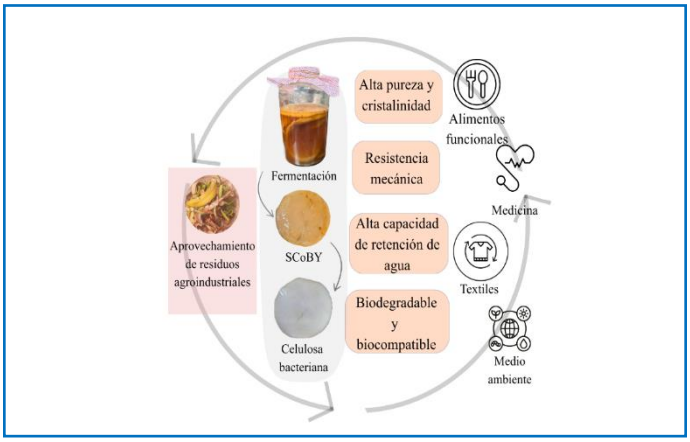


Figura 1. Características y aplicaciones de los subproductos generados mediante fermentación con SCoBY.

Desde la perspectiva de la sustentabilidad, se ha planteado su uso como sustituto de productos derivados del petróleo, empleándola como alternativa para empaques biodegradables, refuerzo de papel y biocueros que son tanto biodegradables como compostables. Asimismo, se ha propuesto su uso como filtro para el tratamiento de aguas residuales, con el fin de eliminar metales pesados y microplásticos, lo que representa un avance significativo en la protección del medio ambiente.

CONCLUSIONES

El SCOBY no solo es un cultivo iniciador que produce bebidas funcionales con beneficios para la salud; también es una máquina productora de celulosa bacteriana. La prometedora duplicidad de este sistema en los ámbitos de la investigación y de la industria resulta especialmente llamativa.

Los beneficios de usar el SCOBY no se limitan a los reactores pequeños, ya que es fácil de escalar. Este polímero es uno de los más versátiles actualmente y puede tener múltiples aplicaciones, lo que lo hace funcional y útil. El resultado de cada investigación representa una oportunidad para resolver problemas actuales. Finalmente, la revalorización de este subproducto no solo podría optimizar procesos biotecnológicos, sino también ofrecer alternativas sostenibles para abordar los desafíos globales en la aplicación de nuevos materiales.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Facultad de Ciencias Químicas de la UAdeC por facilitar los recursos y el uso de sus instalaciones. Igualmente, se agradece a la SECIHTI, por la beca otorgada con el número 1319549.

REFERENCIAS

Almeida, A. da R., Stegemann, C., Maciel, M. V. O. B., Costa, A. de B. da, Schadeck, T. R. C., Medeiros, H. de S., Stegemann, M., & de Armas, R. D. (2024). Produção de celulose bacteriana (CB) em diferentes meios a partir de culturas de kombucha. *Food Science Today*, *3*(1), 20–25. https://doi.org/10.58951/fstoday.2024.004

Alvarado-Rojas, M., Castro-Brenes, J., & Orias-Obando, F. (2024). Bacterial cellulose: Nature's biopolymer. *Tecnología en Marcha*, *37*(4), 162–170. https://doi.org/10.18845/tm.v37i4.6945

Antolak, H., Piechota, D., & Kucharska, A. (2021). Kombucha tea—A double power of bioactive compounds from tea and symbiotic culture of bacteria and yeasts (SCOBY). *Antioxidants*, *10*(10), 1541. https://doi.org/10.3390/antiox10101541

Cruz, M. A., Flor-Unda, O., Avila, A., Garcia, M. D., & Cerda-Mejía, L. (2024). Advances in bacterial cellulose production: A scoping review. *Coatings, 14*(11), 1401. https://doi.org/10.3390/coatings14111401

Dartora, B., Sant'Anna, V., Hickert, L. R., Fensterseifer, M., Ayub, M. A. Z., Flôres, S. H., & Perez, K. J. (2023). Factors influencing kombucha production: Effects of tea composition, sugar, and SCOBY. *Food Science and Technology*, *43*, e8123. https://doi.org/10.5327/fst.8123

Flores Valencia, E. F., & Flores Totora, P. M. (2024). Celulosa bacteriana como agente emulsificante en la producción de una emulsión tipo mayonesa. *Ingeniería Investiga*, *6*, e1034. https://doi.org/10.47796/ing.v6i00.1034

Girard, V.-D., Chaussé, J., & Vermette, P. (2024). Bacterial cellulose: A comprehensive review. *Journal of Applied Polymer Science*, *141*(15), e55163. https://doi.org/10.1002/app.55163

Gomez Soares, M., de Lima, M., & Reolon Schmidt, V. C. (2021). Technological aspects of kombucha, its applications and the symbiotic culture (SCOBY), and extraction of compounds of interest: A literature review. *Trends in Food Science & Technology*, *110*, 539–550. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.017

Harrison, K., & Curtin, C. (2021). Microbial composition of SCOBY starter cultures used by commercial kombucha brewers in North America. *Microorganisms*, *9*(5), 1060. https://doi.org/10.3390/microorganisms9051060

Kitwetcharoen, H., Phung, L. T., Klanrit, P., Thanonkeo, S., Tippayawat, P., Yamada, M., & Thanonkeo, P. (2023). Kombucha healthy drink—Recent advances in production, chemical composition and health benefits. *Fermentation*, *9*(1), 48. https://doi.org/10.3390/fermentation9010048

Mat Zin Boestami, R., Kamari, A., Rohaeti, E., & Hastuti, B. (2024). Production of kombucha SCOBY cellulose by using tea and pumpkin peel waste as fermentation substrates: A comparison study. *Journal of Science and Mathematics Letters*, *12*(2), 119–133. https://doi.org/10.37134/jsml.vol12.2.9.2024

Nam, Y., Lee, J., Kim, S. R., & Kim, J. N. (2025). Isolation and purification of antibacterial compound from kombucha of SCOBY. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, *35*, e2504012. https://doi.org/10.4014/jmb.2504.04012

Shi, Y., Pu, D., Zhou, X., & Zhang, Y. (2022). Recent progress in the study of taste characteristics and the nutrition and health properties of organic acids in foods. *Foods*, *11*(21), 3408. https://doi.org/10.3390/foods11213408

Su, J., Tan, Q., Tang, Q., Tong, Z., & Yang, M. (2023). Research progress on alternative kombucha substrate transformation and the resulting active components. *Frontiers in Microbiology*, *14*, 1254014. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1254014

Tejedor-Calvo, E., & Morales, D. (2023). Chemical and aromatic changes during fermentation of kombucha beverages produced using strawberry tree (*Arbutus unedo*) fruits. *Fermentation*, *9*(4), 326. https://doi.org/10.3390/fermentation9040326

HIDROGELES: MATERIALES INTELIGENTES QUE ALMACENAN AGUA Y TRANSFORMAN LA AGRICULTURA

HYDROGELS: SMART MATERIALS THAT STORE WATER AND TRANSFORM AGRICULTURE

MELÉNDEZ ORTIZ, Héctor Iván

SÁNCHEZ OROZCO, Jorge Luis

BETANCOURT GALINDO, Rebeca

PUENTE URBINA, Bertha Alicia

VERA REYES, Ileana

Centro de Investigación en Química Aplicada. Saltillo, Coahuila, México.

RESUMEN

La agricultura es uno de los sectores productivos que más agua consume. Sumado al crecimiento acelerado de la población en los últimos años, esto ha generado una creciente preocupación por la gestión eficiente del recurso hídrico y por una posible escasez futura. En este contexto, se han impulsado diversas tecnologías orientadas a optimizar el uso y la conservación del agua, entre las cuales destaca el empleo de hidrogeles. Los hidrogeles son matrices poliméricas capaces de absorber grandes cantidades de agua y liberarlas gradualmente. Esta propiedad disminuye la necesidad de riego frecuente y favorece la germinación de semillas, el desarrollo de plántulas y raíces, así como la supervivencia de las plantas. Además, contribuyen a reducir la erosión del suelo y la aplicación excesiva de fertilizantes y pesticidas. Estos materiales pueden ser de origen sintético o natural. Los hidrogeles sintéticos están constituidos principalmente por polímeros y copolímeros de acrilamidas y derivados de ácido acrílico, lo que les confiere alta resistencia mecánica y gran capacidad de retención de agua; sin embargo, presentan baja degradabilidad, lo que implica un mayor impacto ambiental. Por esta razón, ha surgido interés en desarrollar hidrogeles de origen natural, elaborados a partir de polímeros naturales, como los polisacáridos. Aunque estos últimos suelen ser menos resistentes, diversos estudios han demostrado que son biodegradables, lo que reduce su impacto ambiental al descomponerse en condiciones naturales. Por lo tanto, aquí se presenta una breve descripción de estos materiales, así como el panorama actual sobre su uso, particularmente, en la agricultura.

Palabras clave: hidrogeles; polisacáridos; agricultura; maíz.

Correspondencia
hector.melendez@ciqa.edu.mx
https://orcid.org/0000-0002-0560-6875

Fecha de recepción
21 de abril de 2026.
Fecha de aceptación
30 de septiembre de 2026.

Este artículo fue sometido a revisión por pares doble ciego

ABSTRACT

Agriculture is one of the most water-intensive productive sectors. Combined with rapid population growth in recent years, this has raised increasing concerns about efficient water management and the potential for future water scarcity. In this context, various technologies have been developed to optimize water use and conservation, among which the application of hydrogels has gained significant attention. Hydrogels are polymeric matrices capable of absorbing large amounts of water and releasing it gradually. This property reduces the need for frequent irrigation and promotes seed germination, seedling and root development, and overall plant survival. Additionally, they help reduce soil erosion and prevent the excessive application of fertilizers and pesticides. These materials can be either synthetic or natural. Synthetic hydrogels are primarily composed of polymers and copolymers of acrylamide and acrylic acid, which provide high mechanical strength and excellent water retention capacity. However, they exhibit low degradability, leading to greater environmental impact. For this reason, interest has grown in developing natural-origin hydrogels made from polymers such as polysaccharides. Although these materials are generally less mechanically robust, studies have shown that they are biodegradable, thereby reducing their environmental impact as they decompose under natural conditions. Therefore, a brief description of these materials is presented here, along with a current overview of their use, particularly in agriculture.

Keywords: *hydrogels; polysaccharides; agriculture; corn*

INTRODUCCIÓN

El crecimiento acelerado de la población mundial ha incrementado notablemente la demanda de agua potable en los sectores industrial, doméstico y, especialmente, agrícola. De hecho, la agricultura consume cerca del 70 % del agua dulce disponible, lo que ha impulsado la búsqueda de estrategias para producir más alimentos con menos agua.

Entre las alternativas que han despertado mayor interés se encuentran los hidrogeles, materiales capaces de absorber y retener grandes cantidades de agua para liberarla gradualmente en el suelo. Lo cual ayuda a mantener la

humedad en las raíces de las plantas por más tiempo, reduciendo la frecuencia de riego y mejorando el aprovechamiento del recurso hídrico.

En la actualidad, existen tecnologías que optimizan el uso del agua en el campo, como los sistemas de riego por goteo o las microaspersoras de baja presión, a menudo combinados con películas plásticas que reducen la evaporación. Estas técnicas han demostrado ser eficientes, pero su implementación suele centrarse en cultivos de alto valor, ya que requieren una inversión inicial, mantenimiento constante y capacitación especializada.

En este contexto, los hidrogeles surgen como una opción complementaria y potencialmente accesible. En particular, los hidrogeles elaborados a partir de polímeros naturales, como los polisacáridos, han destacado por su abundancia, biocompatibilidad e inocuidad ambiental.

Uno de los principales desafíos radica en que muchos de los hidrogeles utilizados actualmente son de origen sintético. Aunque son eficaces en la retención de agua, su baja biodegradabilidad y la posible presencia de compuestos tóxicos han generado inquietud ambiental y sanitaria. Por ello, la investigación científica se ha enfocado en evaluar alternativas basadas en polisacáridos y estudiar su efecto en la germinación y la calidad de las plántulas. Uno de los objetivos principales en este campo de estudio es desarrollar materiales que no solo mejoren la eficiencia del riego, sino que también reduzcan el impacto ambiental y brinden mayor tranquilidad a productores y consumidores.

HIDROGELES

Los hidrogeles son redes tridimensionales de polímeros capaces de hincharse al entrar en contacto con el agua u otro líquido (figura 1). A nivel microscópico, estas redes contienen poros que permiten la difusión del líquido. Por eso, estos materiales han despertado gran interés en varios campos de investigación científica, como medio ambiente, industria farmacéutica, agricultura, etc.

La clave de su comportamiento radica en dos factores principales: su densidad de entrecruzamiento (qué tan unidas y cercanas están sus cadenas) y su hidrofilicidad (su afinidad por el agua). De esta manera, cuanto mayor sea la

afinidad por el agua y más adecuada sea la estructura de su red, mayor será su capacidad para almacenarla.

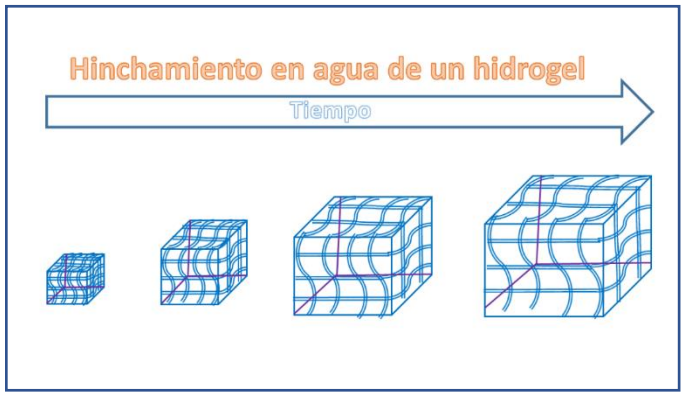


Figura 1. Representación esquemática de una red 3D de un hidrogel y su hinchamiento en agua.

¿Pero por qué y cómo absorben los hidrogeles el agua? Para contestar a esta pregunta, tendremos que adentrarnos en el mundo de la química, en particular, conocer los diferentes grupos funcionales que pueden estar presentes en las estructuras de estos materiales, entre los cuales se encuentran: hidroxilos (-OH), carboxilos (-COOH), amidas ($-CONH_2$), sulfónicos ($-SO_3H$), etc.

Cuando el hidrogel entra en contacto con agua, se establece un equilibrio entre las fuerzas osmóticas (que empujan el agua hacia el interior) y las fuerzas elásticas internas (que se oponen a la expansión). El hinchamiento máximo se alcanza cuando ambas fuerzas se equilibran. Pero si el material se seca, la red colapsa y expulsa el agua, un proceso que puede ser reversible.

Un ejemplo clásico de estos materiales es el poliacrilato de sodio, que presenta grupos carboxilato en su estructura y puede absorber hasta 200 veces su masa en agua (Dorman et al., 2018). Sin embargo, muchos de estos hidrogeles sintéticos se elaboran a partir de derivados del petróleo (como el ácido acrílico o la acrilamida), lo que plantea problemas de degradación y de acumulación de microplásticos.

HIDROGELES A BASE DE POLISACÁRIDOS

Los polisacáridos son grandes moléculas formadas por la unión de muchos azúcares simples, conectados entre sí mediante enlaces glucosídicos (figura 2). Es decir, son largas cadenas construidas a partir de pequeñas piezas que, al unirse, adquieren nuevas propiedades y funciones.

De hecho, un enlace glucosídico puede definirse como un "puente químico" que une dos moléculas de azúcar para formar estructuras más grandes. Se forma cuando el grupo funcional de un azúcar reacciona con el de otro, liberando una molécula de agua durante la reacción. Como resultado, ambos azúcares quedan unidos por un enlace estable que puede dar lugar a cadenas largas y ramificadas.

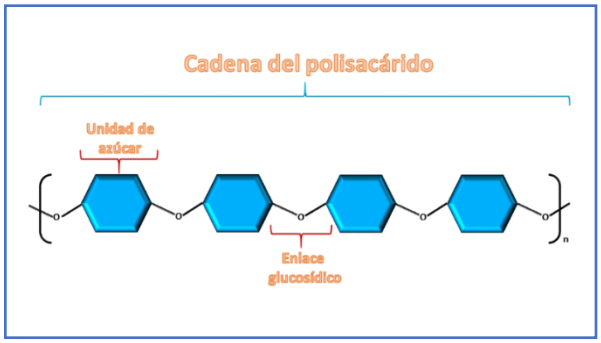


Figura 17. Representación esquemática de una cadena de polisacárido.

En los últimos años, la atención se ha centrado en hidrogeles elaborados a partir de polisacáridos como el almidón, el alginato, el quitosano y la carboximetilcelulosa, entre otros. Estos polímeros naturales presentan ventajas importantes frente a los sintéticos, entre las cuales se encuentran su biodegradabilidad, baja toxicidad, abundancia natural y menor impacto ambiental (Khan et al., 2020), lo cual los hace atractivos para su uso en agricultura, particularmente en zonas áridas o con escasez de agua, donde puedan actuar como "esponjas inteligentes" para proporcionar humedad al suelo y proveer otras ventajas como las mostradas en la figura 3.

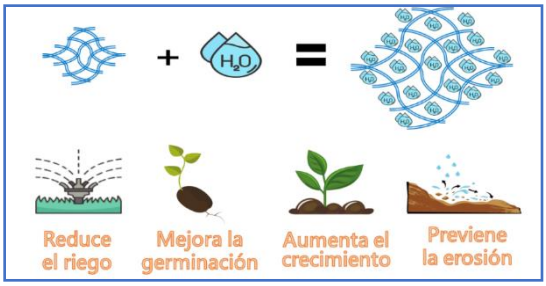


Figura 3. Principales ventajas de los hidrogeles en la agricultura.

Estas "esponjas inteligentes" pueden absorber agua durante la lluvia o el riego, reteniéndola en el suelo y, posteriormente, liberarla gradualmente según la demanda de las raíces o las condiciones climáticas. Sin embargo, los hidrogeles a base de polisacáridos presentan ciertas desventajas frente a los sintéticos, tales como propiedades mecánicas y térmicas inferiores, menor capacidad de hinchamiento y mayor susceptibilidad a la contaminación por bacterias u hongos (Mikhailidi et al., 2024).

Para evitar algunas de estas desventajas, se han desarrollado hidrogeles híbridos que combinan polímeros naturales con sintéticos, por ejemplo, hidrogeles de alcohol polivinílico/quitosano y de acrilamida/carboximetilcelulosa (Jayanudin et al., 2024; Sultan & Taha, 2024). Se ha observado que estos materiales permiten la liberación controlada de fertilizantes y agroquímicos, mejoran la aireación del suelo, reducen la erosión y disminuyen la frecuencia de riego.

En este contexto, los hidrogeles a base de polisacáridos han surgido como materiales prometedores para mejorar el crecimiento y el rendimiento del maíz, uno de los cultivos más importantes del mundo. Durante la última década, diversos estudios han explorado cómo estos materiales pueden actuar como "reservorios inteligentes" en el suelo.

ESTUDIOS SOBRE EL DESARROLLO DE HIDROGELES A BASE DE POLISACÁRIDOS Y SU EFECTO EN EL CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS DE MAÍZ

Uno de los primeros antecedentes relevantes fue reportado por Ibrahim et al. (2015), quienes desarrollaron un hidrogel a partir de residuos de la cosecha de arroz, aprovechando principalmente la lignina residual. En ensayos de campo con *Zea mays* cultivado en suelos salinos, los resultados mostraron un aumento significativo en la absorción de agua y en la concentración de nutrientes en comparación con suelos sin hidrogel. Esto evidenció el potencial de convertir desechos agrícolas en herramientas para la recuperación de suelos degradados. Sin embargo, no todos los estudios han mostrado efectos positivos. Chen et al. (2016) analizaron el impacto de los hidrogeles en la germinación y el desarrollo del maíz en distintos sistemas (macetas e

hidroponía). Los resultados revelaron que, a altas concentraciones, algunos hidrogeles inhibieron el crecimiento y alteraron la morfología radicular, lo que provocó desorganización celular y daño en el parénquima. Esto dejó claro que la dosis y la composición del material son factores críticos. Elbarbary y Ghobashy (2017) sintetizaron hidrogeles superabsorbentes de poliacrilamida combinados con alginato y/o quitosano mediante irradiación gamma. Las plantas tratadas con poliacrilamida/alginato mostraron un incremento de hasta 50 % en el rendimiento de grano. Estos resultados sugieren que la incorporación de polisacáridos puede mejorar la compatibilidad del hidrogel con el sistema suelo-planta. En 2020, Mazloom et al. estudiaron hidrogeles basados en lignina en condiciones de sequía. Las plantas de maíz cultivadas en suelos tratados mostraron una mayor biomasa y un mayor contenido de fósforo, lo que confirma que estos materiales pueden actuar como reservorios estratégicos de agua bajo estrés hídrico.

Más allá de retener agua, los hidrogeles también pueden servir como sistemas de liberación lenta de agroquímicos. Ghobashy et al. (2023) desarrollaron un hidrogel ultraabsorbente basado en hidroxietilcelulosa y acrilamida para liberar urea de manera controlada. El material retuvo agua durante 28 días y mejoró el crecimiento de plántulas de Zea mays bajo distintos niveles de estrés hídrico. Lv et al. (2024) sintetizaron un hidrogel de carbamato de almidón modificado con alginato para liberar urea de forma gradual, lo que promovió el crecimiento de plántulas. Ese mismo año, Lima-Tenório et al. (2024) encapsularon *Azospirillum brasilense*, una bacteria promotora del crecimiento vegetal, en hidrogeles de goma arábiga). Encontraron que las semillas de maíz tratadas con estos hidrogeles mostraron un mayor crecimiento en el área (20 %) y el volumen radicular (60 %), así como en el tallo y el peso fresco. Este enfoque combina la ciencia de materiales y la microbiología agrícola, lo que reduce la dependencia de los fertilizantes químicos.

Más recientemente, Zhang et al. (2025) desarrollaron un hidrogel de quitosano con arcilla laponita para liberar pesticidas de forma controlada. El sistema mostró eficacia frente a los patógenos *Setosphaeria turcica* y *Botrytis cinerea*. Además de su acción antifúngica, el hidrogel reguló el crecimiento vegetal sin dañar las células sanas.

Recientemente, en nuestro grupo de trabajo se han estado elaborando hidrogeles estrictamente a base de mezclas de polisacáridos, en particular maltodextrina, quitosano y alginato, con el fin de obtener materiales con una red tridimensional adecuada, capaces de favorecer el crecimiento de semillas

de maíz. Además, en un contexto de cambio climático y de escasez hídrica, estos materiales podrían convertirse en aliados clave para una agricultura más resiliente y sostenible.

CONCLUSIONES

Frente al desafío global de producir más alimentos con menos agua, los hidrogeles se perfilan como una herramienta innovadora y versátil para la agricultura del futuro. Su capacidad para actuar como reservorios de humedad en el suelo no solo permite optimizar el uso del recurso hídrico, sino también mejorar la disponibilidad de nutrientes, proteger a las plantas frente al estrés y, en algunos casos, servir como vehículos para la liberación controlada de fertilizantes, microorganismos benéficos o pesticidas.

Si bien los hidrogeles sintéticos han demostrado gran eficacia, las preocupaciones ambientales asociadas a su baja degradabilidad han impulsado el desarrollo de alternativas basadas en polisacáridos naturales, más sostenibles y compatibles con el medio ambiente. La evidencia científica muestra resultados prometedores, aunque también subraya la importancia de ajustar cuidadosamente la composición y la dosis para evitar efectos adversos.

En un escenario marcado por el cambio climático y la creciente escasez de agua, la investigación en hidrogeles a base de polisacáridos representa una apuesta estratégica hacia una agricultura más eficiente y respetuosa con el medio ambiente. Si se diseñan adecuadamente, pueden convertirse en herramientas clave para mejorar la productividad del maíz en condiciones adversas, optimizar el uso del agua y reducir la dependencia de insumos químicos convencionales. La pregunta ya no es si los hidrogeles pueden transformar la agricultura, sino cómo diseñarlos de manera segura, eficiente y sostenible para enfrentar los desafíos alimentarios del siglo XXI. Además, podrían convertirse en aliados clave para garantizar la seguridad alimentaria en las próximas décadas. Sin embargo, aún existen retos que afrontar para que este tipo de hidrogeles puedan obtenerse a escala industrial. Entre ellos se encuentran los altos costos de producción (debido a la extracción y purificación de las materias primas), la variabilidad en la composición de los polisacáridos obtenidos y la susceptibilidad a la contaminación, factores que continúan limitando su aplicación industrial.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CIQA por el financiamiento otorgado (proyecto 6797).

REFERENCIAS

Chen, X., Mao, X., Lu, Q., Liao, Z., & He, Z. (2016). Characteristics and mechanisms of acrylate polymer damage to maize seedlings. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *129*, 228–234. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.03.018

Dorman, D. C., Foster, M. L., Olesnevich, B., Bolon, B., Castel, A., Sokolsky-Papkov, M., & Mariani, C. L. (2018). Toxicity associated with ingestion of a polyacrylic acid hydrogel dog pad. *Journal of Veterinary Diagnostic Investigation*, *30*(5), 708–714. https://doi.org/10.1177/1040638718782583

Elbarbary, A. M., & Ghobashy, M. M. (2017). Controlled release fertilizers using superabsorbent hydrogel prepared by gamma radiation. *Radiochimica Acta*, *105*, 865–876. https://doi.org/10.1515/ract-2016-2679

Ghobashy, M. M., Amin, M. A., Ismail, M. A., Nowwar, A. I., El-Diehy, M. A., & Gayed, H. M. (2023). Radiation cross-linked ultra-absorbent hydrogel to rationalize irrigation water and fertilizer for maize planting in drought conditions. *International Journal of Biological Macromolecules*, *252*, 126467. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126467

Ibrahim, M. M., Abd-Eladl, M., & Abou-Baker, N. H. (2015). Lignocellulosic biomass for the preparation of cellulose-based hydrogel and its use for optimizing water resources in agriculture. *Journal of Applied Polymer Science*, *132*(42), 42652. https://doi.org/10.1002/app.42652

Jayanudin, Lestari, R. S. D., Barleany, D. R., Pitaloka, A. B., Yulvianti, M., Lumbantobing, P. I., & Prasetyo, Z. E. (2024). Synthesis of polyvinyl alcohol-based polymer hydrogel as water holding in sandy soil using gamma radiation technique and its application for urea loading. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, *9*, 100634. https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100634

Khan, M., Qadri, W. A., & Gurav, R. K. (2020). Polysaccharide based superabsorbent polymer: A review. *Compliance Engineering Journal*, *11*(9), 261–272. https://doi.org/10.2139/ssrn.3904461

Lima-Tenório, M. K., Karas, L. P., Furmam-Cherobim, F., Guerlinguer, E., Rubira, A. F., Steffens, M. B. R., Galvão, C. W., Tenório-Neto, E. T., & Etto, R. M. (2024). Encapsulation of plant growth-promoting bacteria with gum arabic hydrogels: A

potential system for sustainable agriculture. *Journal of Polymers and the Environment*, *32*(11), 5702–5712. https://doi.org/10.1007/s10924-024-03339-w

Lv, Q., Xiao, T., Dong, G., Tan, X., Zhang, Z., Zhao, M., Zhu, M., Li, J., & Zhang, W. (2024). Preparation and characterization of starch carbamate modified natural sodium alginate composite hydrogel blend formulation and its application for slow-release fertilizer. *International Journal of Biological Macromolecules*, *278*, 134713. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134713

Mazloom, N., Khorassani, R., Zohury, G. H., Emami, H., & Whalen, J. (2020). Lignin-based hydrogel alleviates drought stress in maize. *Environmental and Experimental Botany*, *175*, 104055. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104055

Mikhailidi, A., Ungureanu, E., Tofanica, B. M., Ungureanu, O. C., Fortună, M. E., Belosinschi, D., & Volf, I. (2024). Agriculture 4.0: Polymer hydrogels as delivery agents of active ingredients. *Gels*, *10*(6), 368. https://doi.org/10.3390/gels10060368

Sultan, M., & Taha, G. (2024). Sustained-release nitrogen fertilizer delivery systems based on carboxymethyl cellulose-grafted polyacrylamide: Swelling and release kinetics. *International Journal of Biological Macromolecules*, *266*, 131184. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131184

Zhang, Y.-H., Wei, L.-Q., Liu, C.-S., Jiang, X.-Q., Wu, W.-S., Wei, S.-P., Xin, S., Sheng, X., & Zhong, Z. (2025). Facile construction of eco-friendly chitosan-based supramolecular hydrogels as pesticide delivery systems for plant growth regulation and antifungal applications. *ACS Omega*, *10*, 39162–39173. https://doi.org/10.1021/acsomega.5c05667

DEL CONDUCTOR AL ALGORITMO: OPORTUNIDADES Y DESAFÍOS DE LOS VEHÍCULOS AUTÓNOMOS

FROM DRIVER TO ALGORITHM: OPPORTUNITIES AND CHALLENGES OF AUTONOMOUS VEHICLES

NÚÑEZ ESPINOZA, Gabriela Sugeyli[1]

ALVARADO QUIÑONES, Martha[1]

GALLARDO ESPINOZA, Ricardo[2]

TORRES RODRÍGUEZ, Alma Rosa[2]

RESUMEN

La introducción de los vehículos autónomos constituye una de las transformaciones más significativas de la movilidad contemporánea, con el potencial de redefinir la manera en que las personas y los bienes se desplazan. El presente artículo analiza las principales ventajas y desventajas del uso de vehículos autónomos frente a los vehículos convencionales, considerando aspectos de eficiencia y seguridad. Asimismo, se describen los diferentes niveles de automatización propuestos por la Society of Automotive Engineers (SAE), el papel de la inteligencia artificial como tecnología habilitadora y los beneficios potenciales asociados a su implementación en ámbitos como la seguridad vial, el impacto ambiental, la equidad social, la productividad económica y la planificación urbana.

Asimismo, se analizan los principales desafíos relacionados con los factores humanos, los posibles efectos ambientales de rebote, las vulnerabilidades técnicas y de ciberseguridad, los elevados costos de implementación, así como los dilemas éticos y los vacíos legales asociados a esta tecnología. Los vehículos autónomos tienen potencial para reducir los accidentes asociados al error humano, mejorar el flujo vehicular y contribuir a la disminución de las emisiones contaminantes, particularmente cuando su implementación se combina con sistemas de propulsión eléctrica y fuentes de energía de menor impacto ambiental.

No obstante, estos beneficios potenciales dependen de las condiciones de implementación, del desarrollo tecnológico, de los marcos regulatorios y de las políticas públicas asociadas a la movilidad. Entre los principales retos se encuentran la ciberseguridad, la adaptación de los usuarios, los posibles efectos de rebote derivados del incremento de la demanda de movilidad y los dilemas ético-jurídicos relacionados con la asignación de responsabilidades en caso de accidentes. Se concluye que el impacto de los vehículos autónomos sobre la movilidad y la sostenibilidad dependerá de la manera en que esta

1. Instituto Universitario del Centro de México. Saltillo, Coahuila, México.

2. Departamento de Biotecnología, Departamento de Polímeros. Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila. Saltillo, Coahuila, México.

Correspondencia
alma-torres@uadec.edu.mx
https://orcid.org/0009-0006-4738-519x

Fecha de recepción
14 de agosto de 2026.
Fecha de aceptación
30 de septiembre de 2026.

Este artículo fue sometido a revisión por pares doble ciego

tecnología se integre en los sistemas de transporte y de las estrategias regulatorias, tecnológicas y sociales adoptadas durante su implementación.

Palabras clave: vehículos autónomos; inteligencia artificial; seguridad vial; movilidad; transición.

ABSTRACT

The introduction of autonomous vehicles represents one of the most significant transformations in contemporary mobility, with the potential to redefine how people and goods move. This article analyzes the key advantages and disadvantages of autonomous vehicles compared with conventional ones, focusing on efficiency and safety. It also describes the different levels of automation proposed by the Society of Automotive Engineers (SAE), the role of artificial intelligence as an enabling technology, and the potential benefits of implementation in areas such as road safety, environmental impact, social equity, economic productivity, and urban planning.

Furthermore, the article examines major challenges regarding human factors, potential environmental rebound effects, technical and cybersecurity vulnerabilities, high implementation costs, and the ethical dilemmas and legal gaps associated with this technology. Autonomous vehicles could reduce accidents caused by human error, improve traffic flow, and lower pollutant emissions—particularly when combined with electric propulsion systems and lower-impact energy sources.

However, these potential benefits depend on implementation conditions, technological development, regulatory frameworks, and mobility-related public policies. Key challenges include cybersecurity, user adaptation, potential rebound effects from increased mobility demand, and ethical-legal dilemmas about assigning liability in the event of accidents. The article concludes that the impact of autonomous vehicles on mobility and sustainability will depend on how the technology is integrated into transport systems and on the regulatory, technological, and social strategies adopted during its implementation.

Keywords: *autonomous vehicles; artificial intelligence; road safety; mobility; transition.*

INTRODUCCIÓN

Durante más de un siglo, el automóvil ha desempeñado un papel fundamental en la transformación de la movilidad humana. Tradicionalmente, la conducción ha dependido de la capacidad del conductor para percibir el entorno, interpretar diversas situaciones y tomar decisiones durante el desplazamiento. Sin embargo, el desarrollo de los Sistemas Inteligentes de Transporte (Intelligent Transportation Systems, ITS), los sistemas avanzados de asistencia al conductor y, en particular, los avances recientes en inteligencia artificial (IA) han permitido incrementar progresivamente el nivel de automatización de diversas funciones asociadas a la conducción.

Los vehículos autónomos representan actualmente un área de intenso desarrollo tecnológico, en la que convergen tecnologías relacionadas con sensores, sistemas de percepción, inteligencia artificial, procesamiento de datos, comunicaciones y control automatizado. Su desarrollo plantea la posibilidad de transformar los sistemas actuales de movilidad; sin embargo, también plantea interrogantes sobre la seguridad vial, la eficiencia del transporte, la interacción entre seres humanos y sistemas automatizados, la sostenibilidad ambiental, la accesibilidad, la responsabilidad jurídica y la toma de decisiones en situaciones críticas.

La transición de vehículos convencionales a sistemas con niveles más altos de automatización implica, por tanto, un proceso que trasciende el desarrollo exclusivamente tecnológico. La incorporación progresiva de estos sistemas requiere considerar simultáneamente factores humanos, infraestructura, regulación, ciberseguridad, aceptación social y los posibles impactos económicos y ambientales.

En este contexto, el objetivo del presente artículo es analizar las principales ventajas, limitaciones y desafíos asociados a la implementación de vehículos autónomos frente a los vehículos convencionales, considerando aspectos tecnológicos, ambientales, sociales, económicos, éticos y jurídicos.

ANTECEDENTES

La conducción autónoma se ha consolidado como una de las áreas de mayor desarrollo en los sistemas de movilidad inteligente. En este contexto, los

Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS) integran diversas tecnologías destinadas a optimizar la movilidad, incrementar la seguridad vial, reducir la congestión vehicular y disminuir algunos de los impactos ambientales asociados al transporte (Wadud et al., 2016). Sin embargo, la transición hacia los vehículos autónomos enfrenta importantes desafíos tecnológicos, sociales, jurídicos y éticos. Uno de ellos corresponde a la necesidad de desarrollar marcos regulatorios capaces de responder a escenarios en los que las funciones tradicionalmente desempeñadas por el conductor son asumidas, parcial o totalmente, por sistemas automatizados. Esto plantea interrogantes respecto a la responsabilidad civil y penal en caso de accidentes, así como sobre la toma de decisiones ante situaciones en las que distintas personas pueden estar expuestas a un riesgo (Channon et al., 2019; Li et al., 2018).

Otro desafío consiste en la coexistencia entre vehículos con diferentes niveles de automatización y vehículos convencionales durante el periodo de transición. Esta interacción puede generar nuevos escenarios de riesgo debido a las diferencias entre el comportamiento humano y las respuestas programadas de los sistemas automatizados. Desde la perspectiva ambiental, los vehículos autónomos podrían generar beneficios mediante una conducción más eficiente y su integración con tecnologías de propulsión eléctrica. No obstante, estos beneficios podrían verse parcialmente contrarrestados por el denominado efecto rebote, en el que las mejoras en eficiencia, comodidad o accesibilidad pueden favorecer un incremento de la demanda de viajes y, en consecuencia, reducir parte de los beneficios ambientales inicialmente esperados.

Asimismo, los costos asociados a las tecnologías de automatización podrían constituir una barrera para su adopción y generar diferencias en el acceso a estos sistemas de movilidad. Por esta razón, el desarrollo exitoso de la conducción autónoma dependerá no solo de los avances tecnológicos, sino también de la implementación de políticas públicas, infraestructura, regulación y estrategias orientadas a favorecer una transición segura, sostenible e inclusiva (Channon et al., 2019).

TAXONOMÍA DE LA AUTONOMÍA: LOS SEIS NIVELES DE LA SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS

La conducción automatizada puede comprenderse a partir de la clasificación de los niveles de automatización desarrollada por la *Society of Automotive Engineers* (SAE International). Esta clasificación establece seis niveles, numerados del 0 al 5, que permiten diferenciar las funciones asumidas por el sistema automatizado y el grado de participación requerido del conductor, como se muestra en la figura 1 (Awad et al., 2018; Valero-Matas & De la Barrera, 2020).

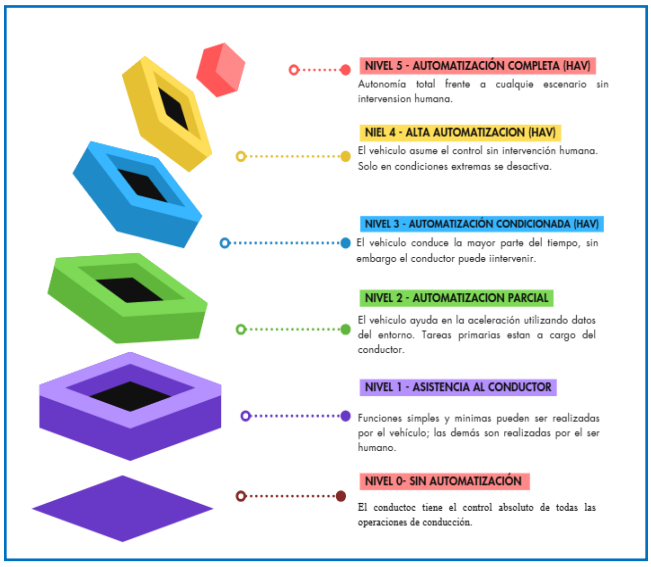


Figura 1. Niveles de automatización propuestos por la Society of Automotive Engineers.
Tomado de Valero Matas y De la Barrera (2020); Channon et al. (2019).

En términos generales, los niveles inferiores corresponden a sistemas en los que el conductor conserva una participación importante en la tarea de conducción, mientras que los niveles superiores representan grados progresivamente mayores de automatización hasta alcanzar escenarios en los que el sistema puede ejecutar la totalidad de la tarea dinámica de conducción bajo determinadas condiciones o, en el nivel máximo, sin requerir la intervención de un conductor humano. Esta clasificación constituye un marco

ampliamente utilizado para describir y comparar las capacidades de los sistemas de automatización vehicular.

INTELIGENCIA ARTIFICIAL COMO CATALIZADOR DE LA AUTONOMÍA

La inteligencia artificial (IA) constituye una de las tecnologías fundamentales para el desarrollo y el funcionamiento de los vehículos autónomos. Los avances en áreas como el reconocimiento de objetos, la visión por computadora, el procesamiento de datos y el aprendizaje automático han permitido mejorar la capacidad de los sistemas automatizados para interpretar la información del entorno y apoyar la toma de decisiones en tiempo real (Bhargava & Tae, 2017).

En los vehículos autónomos, la IA participa en diferentes etapas del proceso de conducción, particularmente en tareas relacionadas con la percepción del entorno, la identificación y clasificación de objetos, la planificación de rutas y el análisis de diferentes escenarios de conducción. Para ello, estos sistemas procesan información procedente de diferentes dispositivos, entre ellos cámaras, radares y otros sensores, con el propósito de generar una representación del entorno que permita ejecutar acciones de conducción de manera dinámica (Kyriakidis et al., 2019; Shaterabadi et al., 2024).

El aprendizaje profundo (*deep learning*) ha cobrado especial relevancia en tareas de percepción, gracias a su capacidad para procesar grandes volúmenes de información y reconocer patrones complejos. Estas herramientas pueden contribuir a funciones como la detección de peatones, vehículos, señales de tránsito y otros elementos del entorno de circulación. No obstante, su aplicación en sistemas de conducción automatizada plantea desafíos relacionados con la confiabilidad, la robustez y la interpretación de las decisiones tomadas por los algoritmos.

Uno de los principales retos consiste en garantizar un funcionamiento seguro ante la diversidad de escenarios que pueden presentarse durante la conducción. Condiciones meteorológicas adversas, baja visibilidad, modificaciones en la infraestructura vial, situaciones poco frecuentes y comportamientos impredecibles de otros usuarios de la vía pueden afectar el desempeño de los sistemas automatizados. Por ello, además de mejorar las

capacidades de percepción y de decisión de los algoritmos, resulta necesario evaluar su funcionamiento en diferentes condiciones operativas.

En este sentido, la inteligencia artificial representa un componente fundamental para incrementar las capacidades de los sistemas de conducción automatizada; sin embargo, su desempeño debe analizarse conjuntamente con otros elementos del vehículo, la infraestructura, los sensores, los sistemas de comunicación y los mecanismos de seguridad.

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA AUTONOMÍA

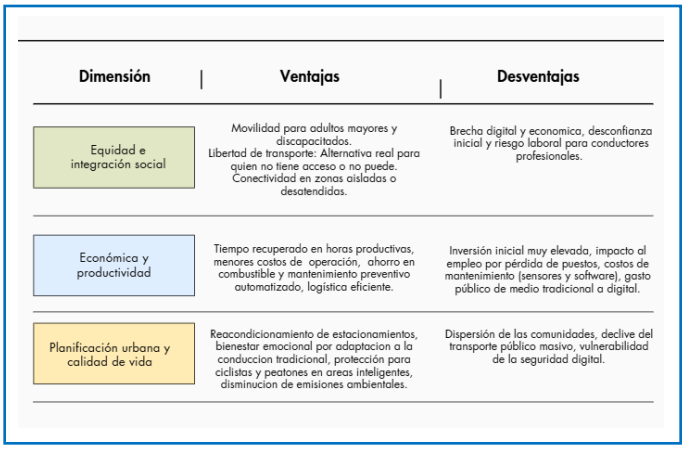
La incorporación de sistemas automatizados en los vehículos presenta ventajas potenciales en diversas dimensiones de la movilidad, pero también conlleva limitaciones y desafíos que deben considerarse durante su implementación. Como se resume en la figura 2, estos efectos pueden analizarse desde perspectivas relacionadas con la equidad e integración social, la economía y la productividad, así como con la planificación urbana y la calidad de vida.

Entre los beneficios potenciales se encuentra una mayor accesibilidad a la movilidad para determinados grupos de población, incluidos quienes presentan limitaciones para conducir vehículos convencionales. Asimismo, la automatización podría optimizar determinadas operaciones de transporte y logística y permitir que parte del tiempo actualmente destinado a la conducción se destine a otras actividades.

Desde la perspectiva urbana, una implementación coordinada de vehículos automatizados podría contribuir a modificar los patrones de movilidad, estacionamiento y circulación. Sin embargo, estos beneficios dependerán de cómo los vehículos autónomos se integren con el transporte público, la infraestructura existente y las políticas de movilidad.

Por otra parte, la adopción de esta tecnología también conlleva desafíos importantes. Los costos iniciales asociados a sensores, sistemas computacionales y otros componentes tecnológicos pueden limitar su accesibilidad. Asimismo, una transición progresiva hacia niveles más altos de automatización podría generar impactos en determinadas actividades laborales vinculadas a la conducción profesional y ampliar brechas de acceso si la tecnología no se implementa con criterios de inclusión (Channon et al., 2019; Terrones Rodríguez, 2021).

En consecuencia, las ventajas y desventajas de la conducción autónoma no deben evaluarse exclusivamente en función del desempeño tecnológico del vehículo, sino también de sus posibles implicaciones sociales, económicas, laborales y urbanas.



Dimensión	Ventajas	Desventajas
Equidad e integración social	Movilidad para adultos mayores y discapacitados. Libertad de transporte: Alternativa real para quien no tiene acceso o no puede. Conectividad en zonas aisladas o desatendidas.	Brecha digital y economica, desconfianza inicial y riesgo laboral para conductores profesionales.
Económica y productividad	Tiempo recuperado en horas productivas, menores costos de operación, ahorro en combustible y mantenimiento preventivo automatizado, logística eficiente.	Inversión inicial muy elevada, impacto al empleo por pérdida de puestos, costos de mantenimiento (sensores y software), gasto público de medio tradicional a digital.
Planificación urbana y calidad de vida	Reacondicionamiento de estacionamientos, bienestar emocional por adaptacion a la conduccion tradicional, protección para ciclistas y peatones en areas inteligentes, disminucion de emisiones ambientales.	Dispersión de las comunidades, declive del transporte público masivo, vulnerabilidad de la seguridad digital.

Figura 2. Principales ventajas y desafíos asociados a la implementación de sistemas de conducción automatizada en las dimensiones social, económica y urbana.
Elaboración propia con base en Channon et al. (2019) y Márquez Díaz (2026).

DILEMAS ÉTICOS Y JURÍDICOS EN LA INTERACCIÓN ENTRE PEATONES Y VEHÍCULOS AUTÓNOMOS

Uno de los desafíos asociados con la conducción autónoma surge en situaciones críticas en las que las decisiones tomadas por un sistema automatizado pueden implicar riesgos para distintos usuarios. Estos

escenarios han generado discusiones sobre la responsabilidad la protección de peatones y pasajeros, y los principios éticos que deberían orientar el comportamiento de los sistemas automatizados. Desde una perspectiva jurídica, determinadas situaciones pueden analizarse a partir de figuras como el estado de necesidad, en particular cuando una acción destinada a evitar un peligro puede ocasionar un daño a terceros. Sin embargo, la aplicación de principios jurídicos desarrollados originalmente para la toma de decisiones humanas resulta compleja cuando la acción es ejecutada o condicionada por un sistema automatizado (Guerra Espinosa & Tisné Niemann, 2021; Terrones Rodríguez, 2021).

Desde el ámbito ético, estas situaciones pueden analizarse desde diferentes perspectivas. Algunas aproximaciones enfatizan la protección de la dignidad individual y cuestionan que una persona pueda ser utilizada deliberadamente como medio para proteger a otra. Otras perspectivas consideran las consecuencias de las decisiones y la magnitud del daño que podría evitarse. Estas diferencias muestran la dificultad de establecer reglas universales para la toma de decisiones automatizadas en escenarios de riesgo (Cohen, 2015; Guerra Espinosa & Tisné Niemann, 2021).

Asimismo, el principio del doble efecto ha sido utilizado en discusiones sobre situaciones en las que una acción destinada a evitar un daño puede producir consecuencias negativas no buscadas directamente. No obstante, trasladar este tipo de razonamiento a la programación y operación de vehículos autónomos requiere un análisis jurídico y ético cuidadoso, particularmente en relación con la intencionalidad, la previsibilidad y la responsabilidad derivadas de las decisiones automatizadas.

En consecuencia, la incorporación de vehículos autónomos plantea la necesidad de desarrollar marcos jurídicos y criterios éticos capaces de responder a escenarios que difieren de los asociados tradicionalmente a la conducción humana. Estos marcos deberán considerar las responsabilidades de fabricantes, desarrolladores, propietarios, operadores y otros actores involucrados en el funcionamiento de los sistemas automatizados.

DESAFÍOS, OPORTUNIDADES Y SOSTENIBILIDAD

La seguridad vial constituye uno de los principales argumentos considerados en el desarrollo de los vehículos autónomos. Diversos estudios han señalado la participación de factores humanos en una proporción importante de los accidentes de tránsito, por lo que la automatización de determinadas funciones de conducción presenta potencial para disminuir algunos riesgos asociados a los errores humanos (Almaskati et al., 2024; Othman, 2021). Sin embargo, esta relación no implica que la automatización pueda eliminar todos los accidentes vinculados a factores humanos. Los sistemas automatizados también plantean nuevos desafíos de seguridad. Fallas técnicas, limitaciones de los sistemas de percepción, condiciones meteorológicas adversas, problemas de infraestructura e interacciones impredecibles con otros usuarios de la vía pueden generar escenarios de riesgo. Asimismo, durante un periodo de coexistencia entre vehículos convencionales y vehículos con diferentes niveles de automatización, podrían surgir nuevas dificultades asociadas a la interacción entre sistemas automatizados y conductores humanos.

Desde la perspectiva ambiental, los vehículos autónomos presentan tanto oportunidades como desafíos (De Leo & Miragliotta, 2025; Othman, 2021). La optimización de determinadas maniobras de conducción, la gestión del tránsito y la integración de sistemas automatizados con vehículos eléctricos podrían contribuir a reducir algunos impactos asociados al transporte. Sin embargo, estos beneficios no son inherentes a la automatización y dependen de factores como la fuente de energía empleada, los patrones de movilidad, la ocupación de los vehículos y su integración con otros sistemas de transporte.

Un aspecto particularmente relevante es el posible efecto de rebote. Una mayor comodidad y accesibilidad del transporte automatizado podría incrementar la demanda de viajes y, en determinadas circunstancias, contrarrestar parte de las mejoras obtenidas mediante una conducción más eficiente (Othman, 2021). Además, la fabricación y operación de los componentes tecnológicos necesarios para la automatización implican el consumo de materiales y energía que deben considerarse al evaluar su sostenibilidad (De Leo & Miragliotta, 2025).

La transición hacia la movilidad autónoma también plantea desafíos éticos, jurídicos y de ciberseguridad. La determinación de responsabilidades en caso de accidentes continúa siendo objeto de debate debido a la participación de diversos actores, como fabricantes, desarrolladores de software, propietarios y usuarios. Paralelamente, la creciente conectividad de los vehículos aumenta la importancia de proteger los sistemas frente a posibles vulnerabilidades y ataques informáticos. Desde las dimensiones económica y social, la adopción de vehículos autónomos puede generar oportunidades relacionadas con nuevos servicios de movilidad y mejoras en la accesibilidad; sin embargo, también podría producir transformaciones en determinadas actividades laborales y generar barreras de acceso asociadas con los costos iniciales de la tecnología (Cárdenas Krenz & Padilla Verde, 2019; Othman, 2021).

Por tanto, la sostenibilidad de los vehículos autónomos debe analizarse desde una perspectiva integral que considere simultáneamente la seguridad, el consumo energético, los impactos ambientales, la accesibilidad, la equidad, la regulación y la ciberseguridad. Los beneficios potenciales de esta tecnología dependerán en gran medida de su integración con políticas de electrificación, transporte público, movilidad compartida e infraestructura adecuada.

CONCLUSIONES

Una vez analizados los datos de las diferentes investigaciones previas, se concluye que los vehículos autónomos presentan un gran potencial para transformar los sistemas de movilidad mediante la incorporación progresiva de tecnologías de automatización, inteligencia artificial, percepción y toma de decisiones. Entre sus beneficios potenciales se encuentran mejoras en determinadas condiciones de seguridad vial, la optimización de los desplazamientos y nuevas posibilidades de accesibilidad y de gestión del transporte. No obstante, estos beneficios no dependen exclusivamente del desarrollo tecnológico. La transición hacia niveles más altos de automatización implica desafíos relacionados con la confiabilidad de los sistemas, la interacción entre vehículos autónomos y convencionales, la ciberseguridad, los costos de implementación, la accesibilidad, los posibles impactos laborales y el establecimiento de responsabilidades jurídicas ante accidentes.

Desde la perspectiva ambiental, la conducción autónoma tampoco puede considerarse intrínsecamente sostenible. Sus efectos dependerán de factores como el tipo de propulsión, las fuentes de energía empleadas, la demanda de viajes, los niveles de ocupación de los vehículos y su integración con el transporte público y con los esquemas de movilidad compartida. En particular, los posibles efectos de rebote deben considerarse al evaluar los beneficios ambientales derivados de una mayor eficiencia operativa. En consecuencia, la implementación de vehículos autónomos requiere una perspectiva integral en la que el desarrollo tecnológico avance de manera coordinada con la regulación, la infraestructura, la ciberseguridad y las políticas de movilidad. El impacto final de esta tecnología dependerá de las condiciones en las que sea incorporada a los sistemas de transporte y de la capacidad de los diferentes actores para gestionar sus implicaciones tecnológicas, ambientales, sociales, económicas, éticas y jurídicas.

REFERENCIAS

Abdel-Aty, M., & Ding, S. (2024). A matched case-control analysis of autonomous vs human-driven vehicle accidents. *Nature Communications, 15*, 4931. https://doi.org/10.1038/s41467-024-48526-4

Almaskati, D., Kermanshachi, S., & Pamidimukkala, A. (2024). Investigating the impacts of autonomous vehicles on crash severity and traffic safety. *Frontiers in Built Environment, 10*, 1383144. https://doi.org/10.3389/fbuil.2024.1383144

Arengas Romero, M. (2025). *Autos autónomos: Explorando los desafíos legales – retos y perspectiva en la responsabilidad civil en Colombia* [Tesis de pregrado, Universidad Libre]. Repositorio Institucional Universidad Libre. https://hdl.handle.net/10901/31307

Awad, E., Dsouza, S., Kim, R., Schulz, J., Henrich, J., Shariff, A., Bonnefon, J.-F., & Rahwan, I. (2018). The Moral Machine experiment. *Nature, 563*, 59–64. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0637-6

Bhargava, V., & Kim, T. W. (2017). Autonomous vehicles and moral uncertainty. In P. Lin, K. Abney, & R. Jenkins (Eds.), *Robot ethics 2.0: From autonomous cars to artificial intelligence* (pp. 5–19). Oxford University Press. https://doi.org/10.1093/oso/9780190652951.003.0001

Cárdenas Krenz, R., & Padilla Verde, V. (2019). Vehículos autónomos: temas viales-dilemas vitales. La tecnología toma el volante. *Persona y Familia*, (8), 67–77. https://doi.org/10.33539/peryfa.2019.n8.1956

Channon, M., McCormick, L., & Noussia, K. (2019). *The law and autonomous vehicles*. Informa Law from Routledge.

Cohen, R. A. (2015). Self-driving technology and autonomous vehicles: A whole new world for potential product liability discussion. *Defense Counsel Journal, 82*(3), 328–334. https://bit.ly/3wd8TLf

De Leo, G., & Miragliotta, G. (2025). Sustainability of autonomous cars: Environmental, social, and economic insights from a systematic review. *Sustainable Production and Consumption, 60*, 159–175. https://doi.org/10.1016/j.spc.2025.09.013

Fernández Llorca, D., Hamon, R., Junklewitz, H., Grosse, K., Kunze, L., Seiniger, P., Swaim, R., Reed, N., Alahi, A., Gómez, E., Sánchez, I., & Kriston, A. (2025). Testing autonomous vehicles and AI: Perspectives and challenges from cybersecurity, transparency, robustness and fairness. *European Transport Research Review, 17*, 38. https://doi.org/10.1186/s12544-025-00732-x

Guerra Espinosa, R., & Tisné Niemann, J. (2021). Vehículos autónomos y estado de necesidad: Análisis desde la perspectiva del peatón sujeto a una situación de peligro. *Revista Chilena de Derecho y Tecnología, 10*(2), 103–122. https://doi.org/10.5354/0719-2584.2021.57874

Kyriakidis, M., de Winter, J. C. F., Stanton, N., Bellet, T., van Arem, B., Brookhuis, K., Martens, M. H., Bengler, K., Andersson, J., Merat, N., Reed, N., Flament, M., Hagenzieker, M., & Happee, R. (2019). Factores humanos, inteligencia artificial y coches autónomos: perspectivas para una implementación compleja. *Human Factors, 61*(6), 849–867.

Lafuente Sánchez, R. (2024). *Inteligencia artificial y vehículos autónomos: responsabilidad civil extracontractual internacional*. Aranzadi.

Li, Y., Díaz, M., Morantes, S., & Dorati, Y. (2018). Vehículos autónomos: Innovación en la logística urbana. *Revista de Iniciación Científica, 4*(1), 34–39. https://share.google/pSbf5Eny6sFf8hlXv

Márquez Diaz, J. E. (2026). Vehículos autónomos: desafíos y ventajas en su implementación. *Revista Doctrina Distrital, 6*(1), 38–62. https://doctrinadistrital.com/ojs2/index.php/RevistaDoctrinaDistrital/article/view/159

Massachusetts Institute of Technology. (2023). Exploring new methods for increasing safety and reliability of autonomous vehicles. *MIT News*. https://news.mit.edu/2023/exploring-methods-increasing-safety-reliability-autonomous-vehicles-0523

Othman, K. (2021). Sostenibilidad de los coches autónomos: Perspectivas ambientales, sociales y económicas a partir de una revisión sistemática. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 11(100433): 159-160.

Shaterabadi, M., Ahmadi Jirdehi, M., Mehrjerdi, H., & Karimi, H. (2024). Artificial intelligence for autonomous vehicles: Comprehensive outlook. In M. H. Rashid (Ed.), *Handbook of power electronics in autonomous and electric vehicles* (pp. 59–79). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99545-0.00002-6

Terrones Rodríguez, A. L. (2021). Una aproximación general al desarrollo de los coches autónomos. *Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad – CTS, 16*(47), 153–175. https://ojs.revistacts.net/index.php/CTS/article/view/234

Valero-Matas, J. A., & De la Barrera, A. (2020). El coche autónomo: ¿Un futuro mejor? *Sociología y Tecnociencia, 10*(1), 136–158. https://doi.org/10.24197/st.1.2020.136-158

Wadud, Z., MacKenzie, D., & Leiby, P. (2016). Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles. *Transportation Research Part A: Policy and Practice, 86*, 1–18. https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.12.001

DEPRESIÓN Y ENVEJECIMIENTO EN EL NORESTE DE MÉXICO: UNA PERSPECTIVA SOCIAL PARA EL ADULTO MAYOR Y SU ENTORNO

DEPRESSION AND AGING IN NORTHEASTERN MEXICO: A SOCIAL PERSPECTIVE FOR OLDER ADULTS AND THEIR ENVIRONMENT

ESPINOZA, José Carlos[1]

BRIONES, Diego Armando[2]

ESPINOSA FUERTE, Estefanía[3]

RESUMEN

Este artículo analiza la situación de la depresión en las personas mayores del noreste de México desde una perspectiva social, considerando los cambios asociados al envejecimiento y su posible relación con las condiciones de vida. El objetivo es describir el comportamiento de los casos nuevos de depresión notificados en Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas durante el periodo 2014–2024, así como reflexionar sobre algunos factores sociales que pueden influir en el bienestar emocional de las personas mayores. Para ello, se utilizaron registros de casos nuevos de depresión de la Secretaría de Salud y se calcularon tasas por cada 100 mil personas de 65 años y más para las tres entidades. El análisis permitió observar variaciones importantes entre los estados y a lo largo del periodo estudiado. Estas cifras deben interpretarse como registros de los servicios de salud y no como una medida de la totalidad de los casos de depresión existentes en la población, debido a posibles diferencias en el acceso, la búsqueda de atención, la detección y la notificación. Los resultados también permiten destacar la importancia de considerar factores como las redes familiares y sociales, la jubilación, la urbanización y la presencia de enfermedades crónicas al abordar el bienestar de las personas mayores, aunque los datos analizados no permiten establecer relaciones causales entre estos factores y los cambios observados. Finalmente, se destaca la importancia de reconocer oportunamente los posibles signos de depresión, fortalecer el acompañamiento familiar y comunitario y favorecer el acceso a la atención profesional. La depresión no debe considerarse una consecuencia natural del envejecimiento y su atención puede contribuir a mejorar la calidad de vida de las personas mayores.

Palabras clave: adulto mayor; salud mental; depresión; aislamiento social; envejecimiento.

1. Facultad de Economía, Universidad Autónoma de Nuevo León. Monterrey, Nuevo León, México.

2. Facultad de Ciencias Políticas y Relaciones Internacionales, Universidad Autónoma de Nuevo León. Monterrey, Nuevo León, México.

3. Facultad de Organización Deportiva, Universidad Autónoma de Nuevo León. Monterrey, Nuevo León, México.

Correspondencia
jose.espinozabr@uanl.edu.mx
https://orcid.org/0000-0001-6718-9336

Fecha de recepción
23 de junio de 2026.
Fecha de aceptación
30 de septiembre de 2026.

Este artículo fue sometido a revisión por pares doble ciego

ABSTRACT

This article examines depression among older adults in northeastern Mexico from a social perspective, considering the changes associated with aging and their possible relationship with living conditions. The objective is to describe the trends in newly reported depression cases in Coahuila, Nuevo León, and Tamaulipas from 2014 to 2024, while also discussing social factors that may influence older adults' emotional well-being. Data on newly reported depression cases from the Mexican Ministry of Health were used to calculate rates per 100,000 people aged 65 years and older in the three states. The analysis shows substantial variation across states and throughout the study period. These figures should be interpreted as health-service records rather than as a measure of total depression cases in the population, since access to care, help-seeking behavior, detection, and reporting may affect the observed numbers. The findings also highlight the relevance of factors such as family and social networks, retirement, urbanization, and chronic health conditions when considering the well-being of older adults. However, the data analyzed do not allow causal relationships to be established between these factors and changes in reported depression cases. Finally, the article emphasizes the importance of recognizing possible signs of depression in a timely manner, strengthening family and community support, and promoting access to professional care. Depression should not be considered a natural consequence of aging, and appropriate attention to mental health can contribute to improving the quality of life of older adults.

Keywords: *older adults; mental health; depression; social isolation; aging.*

INTRODUCCIÓN

Con el paso del tiempo, la vida va cambiando. El entorno, el cual se conforma por familia, amigos, compañeros y demás personas relacionadas, crece y se reduce constantemente, el trabajo se incrementa, cambia o incluso termina, con ello, las rutinas, los hábitos y las relaciones se transforman. No obstante, uno de los grupos poblacionales que experimentan los mayores cambios emocionales es el de los adultos mayores. Para muchas personas mayores, esto puede significar más tiempo en casa, pero también más silencio. Algunos comienzan a aislarse, a perder interés en actividades o a reducir su contacto

social. A veces, esto se normaliza como parte del envejecimiento. Pero no siempre lo es.

Existe una idea muy extendida, que envejecer implica sentirse triste o solo. Sin embargo, la depresión no es una consecuencia natural de la edad. Si bien, el envejecimiento trae consigo cambios físicos y sociales, preservar y mejorar la salud emocional es fundamental. No debe considerarse normal sentirse sin ánimo, sin motivación ni ganas de conectar con el entorno.

La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2026a) ha definido la depresión como un trastorno mental común que implica un estado de ánimo deprimido o la pérdida del placer o del interés por actividades durante periodos prolongados. Por lo tanto, la depresión afecta la forma en que una persona piensa, siente, actúa e interactúa con su entorno, no es debilidad ni falta de ganas. Asimismo, las personas que enfrentan un trastorno mental suelen requerir apoyo adicional para mantener relaciones interpersonales y participar plenamente en ámbitos de la vida cotidiana (OMS, 2026b).

La depresión en las personas mayores puede manifestarse mediante cambios persistentes en el estado de ánimo, la actividad cotidiana, el sueño, el apetito, la concentración o el interés por actividades que antes resultaban agradables. Algunos de estos cambios también pueden estar relacionados con otras condiciones propias del envejecimiento, por lo que su presencia no implica necesariamente depresión y requiere una valoración adecuada. Por lo cual es importante distinguir entre momentos de tristeza o desánimo y síntomas persistentes que afectan las actividades y relaciones de la persona. La depresión en las personas mayores puede afectar su calidad de vida y suele coexistir con problemas de salud física, por lo que su identificación y atención son importantes (Baker et al., 2021).

Este texto está dirigido a adultos mayores, familiares, cuidadores y estudiantes de educación media superior, superior y posgrado interesados en comprender los retos emocionales del envejecimiento.

BREVE HISTORIA DE LA SALUD MENTAL EN MÉXICO

La atención de la salud mental en México tiene antecedentes que se remontan al siglo XX, entre ellos la creación del Hospital San Hipólito en 1566 (UNAM, 2016). Sin embargo, la creación de instituciones especializadas durante el siglo XX supuso un cambio importante en la forma de abordar los problemas de salud mental. Entre estos antecedentes destaca la inauguración del Manicomio General La Castañeda en 1910, que se convirtió en una referencia importante de la atención psiquiátrica institucional en el país y en el punto de partida de la psiquiatría pública, aunque se caracterizó por condiciones de atención deficientes y un modelo predominantemente asilario (De la Fuente, 1988).

Durante las décadas posteriores, instituciones privadas complementaron la limitada capacidad estatal y contribuyeron al desarrollo de la psiquiatría en el país. A partir de los años cuarenta se consolidaron importantes avances institucionales y académicos, como la creación de la Unidad de Neuropsiquiatría del IMSS en 1944 y los primeros programas formales de especialización en psiquiatría en el Manicomio General y, posteriormente, en la UNAM (Campos-Farfán, 2021).

Entre las décadas de 1960 y 1980 se produjo una reorganización de la infraestructura psiquiátrica nacional mediante la creación de hospitales especializados y de nuevas instancias administrativas enfocadas en la salud mental. En este periodo destacó la figura de Ramón de la Fuente Muñiz, quien impulsó la investigación científica y la modernización de la psiquiatría mexicana, especialmente a través del Instituto Mexicano de Psiquiatría, fundado en 1979 y posteriormente denominado Instituto Nacional de Psiquiatría Ramón de la Fuente Muñiz (Campos-Farfán, 2021). En años recientes, la política de salud mental en México ha evolucionado hacia un modelo comunitario y de atención primaria, reflejado en la creación del Secretariado Técnico del Consejo Nacional de Salud Mental y, posteriormente, de la Comisión Nacional de Salud Mental y Adicciones (CONASAMA), organismo que actualmente coordina las estrategias nacionales. No obstante, en los últimos años la política pública en salud mental no ha sido un eje prioritario del financiamiento público, lo que se traduce en mejoras relativamente escasas en el sistema nacional de salud mental (Espinoza y Ramírez Díaz, 2026).

LA SITUACIÓN EN EL NORESTE DEL PAÍS

Los datos históricos oficiales sobre salud mental en México existen desde 2014, año en que la Secretaría de Salud (2026) comenzó a difundirlos públicamente a través de la Dirección General de Epidemiología. Para observar el comportamiento de la depresión en las personas mayores se utilizaron los casos nuevos notificados registrados para personas de 65 años y más en Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas durante el periodo 2014–2024, dada la disponibilidad de información. Las tasas se calcularon por cada 100 mil personas de 65 años y más de cada entidad y año.

Los datos permiten observar el comportamiento de los casos registrados por los servicios de salud, pero no necesariamente reflejan todos los casos de depresión existentes en la población. Factores como la búsqueda de atención, el acceso a los servicios o el registro pueden influir en las cifras observadas.

En la tabla 1 se muestran los casos nuevos de depresión notificados en personas de 65 años o más. En promedio, en Coahuila se han observado 235 casos anuales, en Nuevo León, 543, y en Tamaulipas, 862.

Tabla 7. Casos nuevos de depresión notificados en personas de 65 años y más en el noreste de México, 2014-2024.

Año	Coahuila	Nuevo León	Tamaulipas
2014	331	101	449
2015	99	511	1,239
2016	83	641	1,240
2017	264	671	1,318
2018	100	681	1,180
2019	267	729	990
2020	121	341	575
2021	220	464	785
2022	412	590	576
2023	409	644	624
2024	279	597	507

En la figura 1 se muestran los casos nuevos de depresión notificados por cada 100,000 personas de 65 años y más en los estados de Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas. Durante el periodo analizado, las tres entidades presentan variaciones en los casos nuevos notificados. En promedio, Coahuila registró 106 casos por cada 100 mil personas de 65 años y más; Nuevo León, 134; y Tamaulipas, 326.

En la Figura 1 se observan distintas dinámicas en cada uno de los estados; sin embargo, se observa una disminución considerable en los registros de 2020, lo cual debe estar influido por la pandemia de Covid-19. Sin embargo, esta variación no implica necesariamente que la depresión haya disminuido en la población, ya que los registros de los servicios de salud pueden verse afectados por cambios en la atención, el diagnóstico y la notificación de casos.

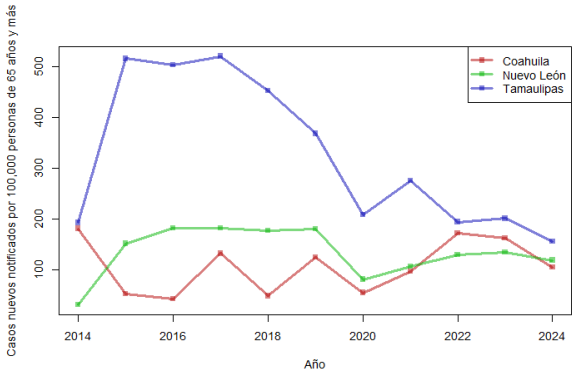


Figura 1. Casos nuevos de depresión notificados por cada 100 mil personas de 65 años y más en el noreste de México, 2014-2024.

En la región noreste del país no existe una convergencia histórica en el tema, pero la divergencia se ha ido transformando, incluso en los últimos años parece que se comienza a esbozar una convergencia en la región.

Estos cambios pueden ir acompañados de transformaciones sociales y familiares, como modificaciones en las redes de apoyo, migración de familiares, jubilación, urbanización o la presencia de enfermedades crónicas. Estos factores se han relacionado con el aislamiento social y el bienestar de las personas mayores, en particular ante cambios en las redes familiares y sociales (Courtin & Knapp, 2015). No obstante, los datos presentados en este artículo no permiten establecer una relación causal entre ellos y los cambios observados en los registros de depresión.

SEÑALES DE ALERTA Y RECOMENDACIONES

El adulto mayor y su entorno deben identificar señales de alerta para detectar tempranamente patrones y tendencias en la salud emocional. Es importante observar ciertos cambios, tales como el abandono de actividades habituales, la falta de interés en convivir, cambios en el sueño, modificaciones del apetito, comentarios negativos constantes y sensación de inutilidad.

Estas señales no deben ignorarse ni minimizarse, tanto por el propio adulto mayor como por su entorno. En el entorno, el acompañamiento es clave. Conversar y mantener el contacto social puede marcar una gran diferencia. Incluso el solo escuchar puede ser el punto de inflexión en el plano emocional.

No obstante, el acompañamiento no sustituye la valoración y el tratamiento de profesionales de la salud cuando estos son necesarios. Ante situaciones complejas, pensamientos de muerte o de autolesión, es importante buscar atención profesional de inmediato. Además de acudir con los especialistas, es recomendable asistir periódicamente a los servicios de salud que tengan a su alcance, participar en actividades comunitarias, mantener rutinas activas, realizar actividad física, fomentar la convivencia familiar y, en la medida de lo posible, no dejar de fortalecer la curiosidad intelectual. Es decir, continuar con hábitos saludables, ya que la depresión tiene tratamiento y mejorar la calidad de vida es posible.

El envejecimiento es parte de la vida, como lo fue ser niño, adolescente y adulto, pero vivir con bienestar también lo es. La salud mental también debe entenderse en relación con las condiciones sociales y económicas que acompañan la trayectoria de vida de las personas (Espinoza & Sánchez Rodríguez, 2025). Siempre es momento de construir una sociedad más consciente y solidaria, en especial para los grupos vulnerables.

AGRADECIMIENTOS

El autor José Carlos Espinoza agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), anteriormente Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), por el apoyo brindado a través del Programa de Estancias Posdoctorales por México. La autora Estefanía Espinosa Fuerte agradece a la Secretaría de Ciencia,

Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) el apoyo otorgado mediante el Programa de Becas Nacionales para la realización de estudios de doctorado.

REFERENCIAS

Baker, R., Wilson, S., & Daunt, L. (2021). Depression in older adults. *Practice Nursing*, 33(1): 13–17. https://doi.org/10.1177/17557380211052072

Campos-Farfán, C. (2021). Ramón de la Fuente Muñiz, forjador de la psiquiatría moderna en México y Latinoamérica. En el centenario de su nacimiento. *Gaceta Médica de México, 157*(3), 334–337. https://doi.org/10.24875/gmm.21000094

Courtin, E., & Knapp, M. (2015). Social isolation, loneliness and health in old age: A scoping review. *Health & Social Care in the Community*, 25(3): 799–812. https://doi.org/10.1111/hsc.12311

De la Fuente, R. (1988). Semblanza de la salud mental en México. *Salud Pública de México, 30*(6), 861–871.

Espinoza, J. C., & Sánchez Rodríguez, J. S. (2025). Impacto de las amplias jornadas laborales sobre la salud mental en México. *Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento, 13*(27), 00002. https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2025.27.91182

Espinoza, J. C., & Ramírez Díaz, K. I. (2026). Depresión y gasto público en salud mental en México: 2014–2022. *Economía, Sociedad y Territorio, 26*, e2333. https://doi.org/10.22136/est20262333

Organización Mundial de la Salud. (2026a, 11 de septiembre). *Trastorno depresivo (depresión)*. https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/depression

Organización Mundial de la Salud. (2026b, 11 de septiembre). *Trastornos mentales*. https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/mental-disorders

Secretaría de Salud. (2026). *Anuario de Morbilidad 2014–2024*. Dirección General de Epidemiología. https://epidemiologia.salud.gob.mx/anuario/html/index.html

Universidad Nacional Autónoma de México. (2016, 10 de mayo). *En la locura intervienen aspectos tanto genéticos como sociales: académica de la UNAM*. Dirección General de Comunicación. https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2016_316.html