

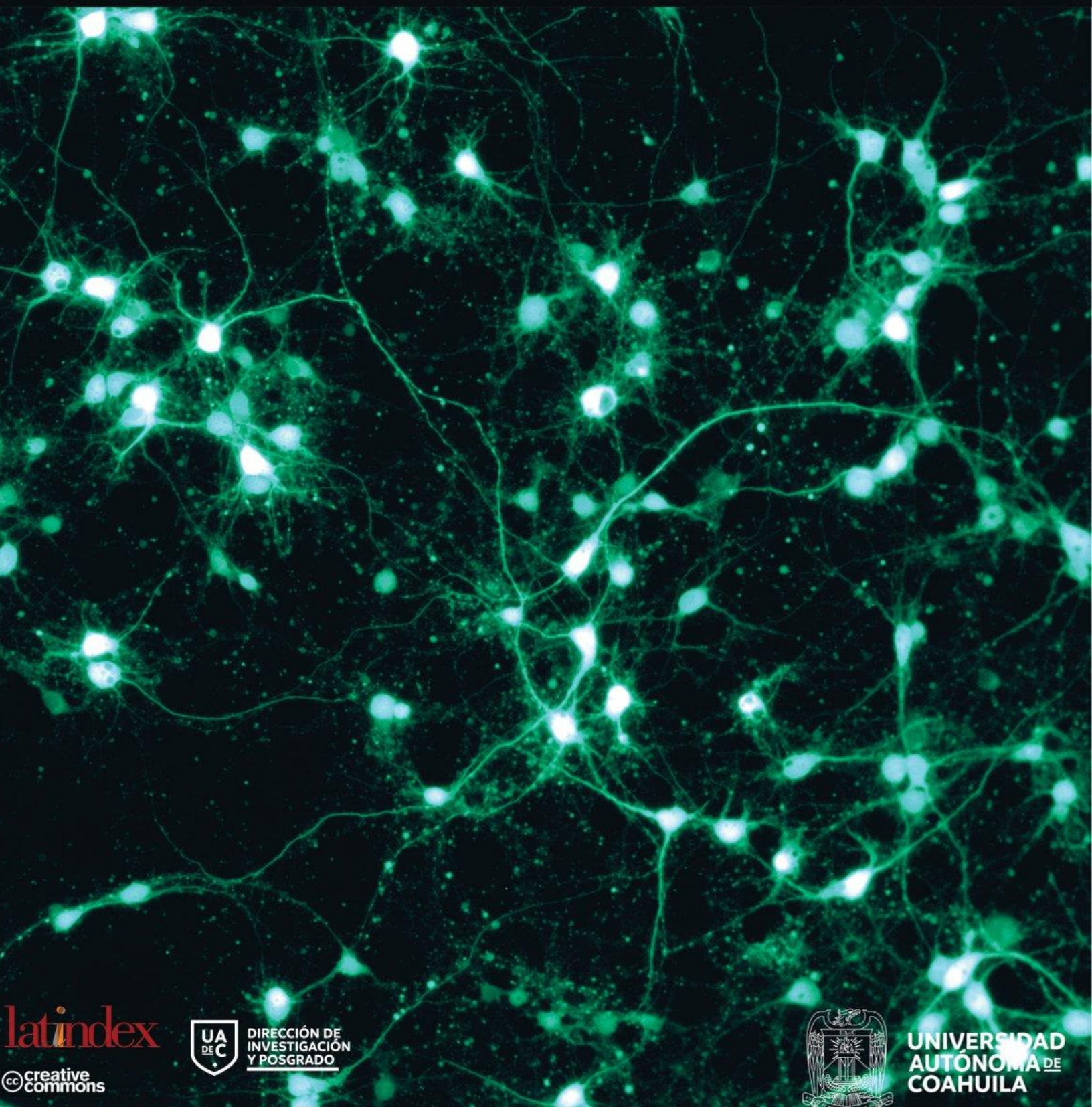
CienciAcierta

AÑO 22, NÚMERO 87

ISSN: 2683-1848

JULIO-SEPTIEMBRE 2026

Latindex: 30518



latindex

CC creative commons



DIRECCIÓN DE
INVESTIGACIÓN
Y POSGRADO



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA DE
COAHUILA

Foto: GFP Neurons, National Institute on Aging (NIH), Wikimedia Commons, dominio público

PUBLICADA DESDE 2005

ISSN 2683-1848

CienciAcierta, año 22, No. 87 julio-septiembre 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 Ilin. 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 julio de 2026.

Cienciacierta es una publicación científica, tecnológica y humanística, multidisciplinaria, cuyo objetivo es divulgar el avance del conocimiento, se enfoca en las siguientes áreas: Ciencias Naturales y Exactas; Arquitectura, Ingeniería y Tecnología; Medicina y Ciencias de la Salud; Ciencias Sociales y del Comportamiento; Humanidades y Arte y Ciencias Administrativas y de Gestión.

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 externos a la UAdeC.

EN PORTADA

Neuronas humanas expresando proteína fluorescente verde (GFP), una técnica utilizada en neurociencia para visualizar estructuras celulares en tiempo real. La imagen revela la complejidad de las redes neuronales mediante fluorescencia, transformando procesos biológicos invisibles en patrones de alta intensidad visual.

GFP Neurons [imagen microscópica fluorescente]. National Institute on Aging (NIA), National Institutes of Health (NIH). Wikimedia Commons. Dominio público (U.S. Government work). Disponible en: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:GFP_Neurons.png

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

EL TREN INTERURBANO MÉXICO-TOLUCA, UN SERVICIO DE BAJA EFICIENCIA	1
<i>ANÁLISIS DE INDICADORES DE OPERACIÓN ZINACANTEPEC-SANTA FE</i>	
<i>MÉXICO-TOLUCA COMMUTER RAIL, A LOW EFFICIENCY SERVICE</i>	
<i>OPERATION INDICATORS ANALYSIS ZINACANTEPEC-SANTA FE</i>	
RAMÍREZ RODRÍGUEZ, Mercedes; MARTÍNEZ MUÑOZ, Gildardo; GALENA RAMÍREZ, Brenda Isabel.	
 OBTENCIÓN DE MATERIALES BASE CELULOSA A PARTIR DE LA BIOMASA <i>PHRAGMITES AUSTRALIS</i> PARA LA FABRICACIÓN DE EMBALAJES SOSTENIBLES	 13
<i>PRODUCTION OF CELLULOSE-BASED MATERIALS FROM PHRAGMITES AUSTRALIS BIOMASS FOR THE MANUFACTURE OF SUSTAINABLE PACKAGING</i>	
PACHECO CALERA, Ricardo Fredy; MARTÍNEZ FLORES, Rocío; PAREJA RODRÍGUEZ, Raúl; SALAZAR PÉREZ, Javier; ALONSO LEMUS, Ivonne Liliana.	
 ANÁLISIS COMPARATIVO DEL ÁREA DEL TRAZADOR EN TRES DISTRIBUIDORES CON INTERIOR PARALELEPIPÉDICO MEDIANTE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES	 26
<i>COMPARATIVE ANALYSIS OF THE TRACER AREA IN THREE TUNDISHES WITH REGULAR PARALLELEPIPED GEOMETRY USING IMAGE PROCESSING</i>	
CERRITOS ARRIAGA, María de Lourdes; RODRÍGUEZ ÁVILA, Jafeth; MORALES DÁVILA, Rodolfo C.; GÓMEZ CASAS, Josué; OLVERA ROMERO, Gerardo Daniel.	
 CRECER EN LA FRONTERA: DINÁMICAS DE LA CRIANZA EN EL NORTE DE LA PROVINCIA DE COAHUILA DURANTE LA SEGUNDA MITAD DEL SIGLO XVIII	 38
EL CASO DE MARÍA GERTRUDIS SÁNCHEZ NAVARRO	
<i>GROWING UP ON THE FRONTIER: CHILD-REARING DYNAMICS IN NORTHERN COAHUILA PROVINCE DURING THE SECOND HALF OF THE 18TH CENTURY</i>	
<i>THE CASE OF MARÍA GERTRUDIS SÁNCHEZ NAVARRO</i>	
FREYSSINIER Y DÁVILA, Anarika; VALDÉS DÁVILA, Carlos Manuel.	
 ORBIFOLD NO ABELIANO S_3 Y SU GRUPO DE SABOR	 57

NON-ABELIAN ORBIFOLD S_3 AND ITS FLAVOR GROUP

PÉREZ MARTÍNEZ, Ricardo.

ARTÍCULOS DE DIVULGACIÓN

DEL GATO A LOS ELECTRONES: SCHRÖDINGER SE TOPA CON LA DFT

70

FROM CAT TO ELECTRONS: SCHRÖDINGER MEETS DFT

GONZÁLEZ MORENO, Fernanda Itzel; BOUJNAH, Mourad; MUSTRE DE LEON, José; ESPINOSA FALLER, Francisco Javier; CABALLERO BRIONES, Felipe.

UNA NUEVA ERA PARA EL TRATAMIENTO DEL ACNÉ: LIBERACIÓN CONTROLADA DE MEDICAMENTOS MEDIANTE BIOPOLÍMEROS

79

A NEW ERA FOR ACNE TREATMENT: EXTENDED-RELEASE MEDICATION THROUGH BIOPOLYMERS

SALAZAR CASTILLO, Abril; FARÍAS CEPEDA, Lorena; CASTAÑEDA FACIO, Adalí Oliva; ROSALES MARINES, Lucero; OVANDO MEDINA, Víctor Manuel.

ARTÍCULOS DE REVISIÓN

PEROVSKITAS: UNA ALTERNATIVA PROMETEDORA PARA LA PRÓXIMA GENERACIÓN DE PÁNELES SOLARES

94

PEROVSKITES: A PROMISING ALTERNATIVE FOR THE NEXT GENERATION OF SOLAR PANELS

ZÚÑIGA AVILÉS, Dalía; MARTÍNEZ LÓPEZ, Miguel; TÉLLEZ LÓPEZ, Antonio; ALCÁNTARA COBOS, ADRIÁN.

METALURGIA DE LAS UNIONES DISÍMILES ENTRE ACEROS INOXIDABLES

116

METALLURGY OF DISSIMILAR JOINTS BETWEEN STAINLESS STEELS

SÁENZ GALINDO, Rocío; GARCÍA RENTERÍA, Marco; CRUZ HERNÁNDEZ, Ventura Lilia.

GELES METAL-ORGÁNICOS: HACIA NUEVOS MATERIALES MULTIFUNCIONALES

128

METAL-ORGANIC GELS: TOWARDS NEW MULTIFUNCTIONAL MATERIALS

JARAMILLO GARCÍA, Jonathan; MORALES LUCKIE, Raúl Alberto; SÁNCHEZ MENDIETA, Víctor; TÉLLEZ LÓPEZ, Antonio.

IMPORTANCIA DE LA POROSIDAD DE LAS PARTÍCULAS QUE SE PROCESAN A TRAVÉS DE FLOTACIÓN DE ESPUMA, UNA REVISIÓN <i>IMPORTANCE OF PARTICLE POROSITY IN MATERIALS PROCESSED THROUGH FROTH FLOTATION, A REVIEW</i> MACÍAS VIRAMONTES, Luis Alberto; LÓPEZ SAUCEDO, Felipe de Jesús; CARRILLO PEDROZA, Francisco Raúl; DÍAZ FLORES, L.L.; BATISTA RODRÍGUEZ, José Alberto; BATISTA CRUZ, Ramón Yosvanis; ALMAGUER CARMENATES, Yuri.; MORONES SILLAS, J.A.	149
DEL LODO AL METAL CÓMO EXTRAER ESTAÑO DE RESIDUOS DE ACERO DE FORMA SOSTENIBLE UNA REVISIÓN <i>FROM SLUDGE TO METAL</i> <i>HOW TO SUSTAINABLY EXTRACT TIN FROM STEEL WASTE</i> RODRÍGUEZ TORRES, Isela Jocelín; GONZÁLEZ DE LA CRUZ, José Manuel; PUENTE SILLER, Damaris Margarita; FUENTES ACEITUNO, Juan Carlos.	165
RETOS ACTUALES Y FUTUROS PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR <i>CURRENT AND FUTURE CHALLENGES FOR THE UTILIZATION OF SOLAR ENERGY</i> GONZÁLEZ CALVILLO, Jesús Rodolfo; AGUILERA GONZÁLEZ, Elsa Nadia.	180
BAINITA: LA MICROESTRUCTURA QUE COMBINA DUREZA Y TENACIDAD EN LOS ACEROS <i>BAINITE: THE MICROSTRUCTURE THAT COMBINES HARDNESS AND TOUGHNESS IN STEELS</i> CORTEZ GARCÍA, Manuel Alejandro; SORIA AGUILAR, María De Jesús; GUTIÉRREZ CASTAÑEDA, Emmanuel José; CARRILLO PEDROZA, Francisco Raúl.	191
DEL MINERAL AL METAL BRILLANTE: NUEVAS MIRADAS A LA EXTRACCIÓN Y REFINACIÓN DEL ANTIMONIO <i>FROM ORE TO SHINING METAL: NEW PERSPECTIVES ON THE EXTRACTION AND REFINING OF ANTIMONY</i>	205

GALAVIZ BRIONES, Lorena; CARRILLO PEDROZA, Francisco Raúl; SORIA AGUILAR, María De Jesús; GARCÍA GUERRA AGUILAR, Josefina; GONZÁLEZ ANAYA, Juan Antonio.

INFLUENCIA DE LOS NANOTUBOS DE CARBONO DE PARED MÚLTIPLE (MWNT) EN LA RESISTENCIA AL DESGASTE DEL CERMET WC-CO
INFLUENCE OF MULTI-WALLED CARBON NANOTUBES (MWNTS) ON THE WEAR RESISTANCE OF WC-CO CERMETS

220

SAN MIGUEL IZA, Isabela; FALCÓN FRANCO, Lázaro Abdiel; GARCÍA VILLARREAL, Sergio; RODRÍGUEZ PULIDO, Alicia.

EL TREN INTERURBANO MÉXICO-TOLUCA. UN SERVICIO DE BAJA EFICIENCIA ANÁLISIS DE INDICADORES DE OPERACIÓN ZINACANTEPEC- SANTA FE

INVESTIGACIÓN

MEXICO-TOLUCA COMMUTER RAIL.

A LOW EFFICIENCY SERVICE

OPERATION INDICATORS ANALYSIS, ZINACANTEPEC-SANTA FE

RAMÍREZ RODRÍGUEZ, Mercedes¹MARTÍNEZ MUÑOZ, Gildardo²GALENA RAMÍREZ, Brenda Isabel³

RESUMEN

El Tren Interurbano México-Toluca ofrece un servicio de baja eficiencia, ya que opera a una velocidad promedio de 80 km/h. Tiene una longitud de 57,87 km, de los cuales 37 se encuentran en el Estado de México y veinte en la Ciudad de México. Asimismo, cuenta con un tramo de túneles de 5 km, dos terminales y tres estaciones intermedias. Consta de ocho trenes, cada uno con cinco vagones, con capacidad total de 96 plazas y, en promedio, de quince personas por vagón. El intervalo entre los trenes es de treinta a cuarenta minutos y el tiempo de traslado es de cincuenta a sesenta minutos. El objetivo del presente artículo es analizar los indicadores de operación del Tren Interurbano, con base en el Sistema Nacional de Indicadores Ferroviarios, el cual se fundamenta en indicadores cuantitativos determinados por la ingeniería de este medio de transporte, a fin de explicar su baja eficiencia.

Palabras clave: indicadores de operación del transporte ferroviario; Tren Interurbano México-Toluca; bajos niveles de eficiencia.

ABSTRACT

The Mexico City-Toluca Intercity Train offers a low-efficiency service, operating at an average speed of 80 km/h. The entire line spans 57.87 km, of which 37 km are in the State of Mexico and 20 km in Mexico City proper. It also includes a 5 km tunnel section, 2 terminals, and 3 intermediate stops. The fleet consists of 8 trains, all with 5 cars, each with a total capacity of 96 seats, and an average of 15 passengers per car. The interval between trains is 30-40 minutes, and the end-to-end journey takes about 50-60 minutes. The objective of this

1. Centro de Investigaciones en Arquitectura y Diseño, Facultad de Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, Estado de México, México.

2. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, Estado de México, México.

3. Instituto de Estudios sobre la Universidad, Facultad de Humanidades, Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, Estado de México, México.

Correspondencia

merrramirez@yahoo.com.mx
<https://orcid.org/0009-0007-0700-1718>

Fecha de recepción

27 de octubre de 2025.

Fecha de aceptación

10 de marzo de 2026.

article is to analyze the operational indicators of the Intercity Train, based on the National Railway Indicators System, using quantitative indicators determined by the engineering type of this means of transport, to explain its low efficiency.

Keywords: operation indicators of railway transport; México-Toluca commuter rail; low levels of operational efficiency.

INTRODUCCIÓN

Las ciudades actuales se transforman vertiginosamente en metrópolis inteligentes, por lo que la conectividad urbana es fundamental. En este sentido, los avances de la tecnología y la digitalización han permitido que las urbes no solo sean centros económicos, sino también ecosistemas dinámicos y conectados de manera eficiente, para mejorar la calidad de vida de sus habitantes (Kone, 2024).

En ese tenor, la estructura urbana y la integración de las tecnologías avanzadas han generado nuevos diseños de edificios sustentables y sistemas de transporte eficientes. Por ello, la movilidad urbana, la conectividad y la eficiencia de los sistemas de transporte sustentables juegan un papel crucial en el desarrollo sostenible de las ciudades.

Durante las últimas tres décadas, el desarrollo sostenible, el crecimiento poblacional, la expansión de las ciudades, la movilidad y la conectividad en la ciudad de Toluca, Estado de México, han presentado una transformación acelerada, como lo muestra la Figura 1.

En la Figura 1 se observa la transformación espacial de Toluca y su zona metropolitana, así como las nuevas formas de movilidad urbana y conexión entre los municipios de Zinacantepec, San Mateo Atenco, Lerma y Ocoyoacac.

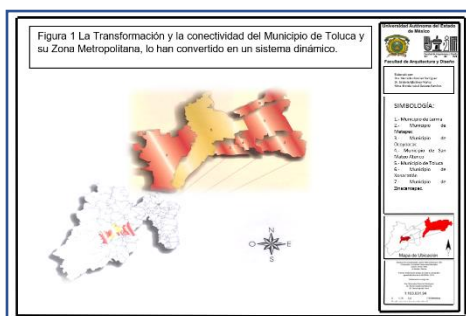


Figura 1. El municipio de Toluca y su zona metropolitana

Con el fin de mejorar la conectividad entre Toluca y Ciudad de México (CDMX), se diseñó un proyecto de transporte ferroviario de pasajeros como alternativa para el desplazamiento de los usuarios, como se muestra en la Figura 2. Se trata de un sistema sustentable, amigable con la naturaleza y el entorno social. El proyecto es de bajo impacto, por lo que la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, el Parque de la Marquesa y CDMX sufrieron una alteración negativa mínima, pues se tomaron en cuenta las características de cada tramo para aprovechar las condiciones más adecuadas en el diseño, el trazo y la construcción (Coespo, 2024). Entre los objetivos de este transporte se encuentran reducir el tiempo de traslado y mejorar la conexión regional entre ambas ciudades. El Tren Interurbano México-Toluca fue inaugurado el 15 de septiembre de 2024.

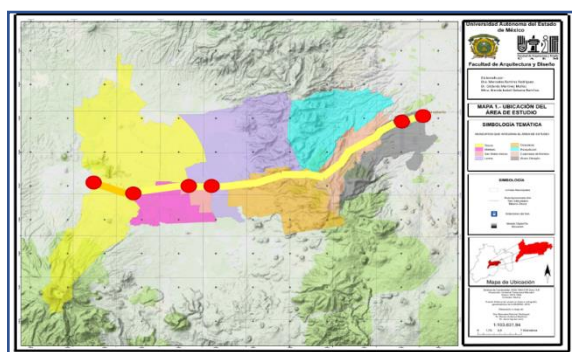


Figura 2. Proyecto del Tren Interurbano México-Toluca.

Por lo anterior, conviene formular la pregunta: ¿cuáles son los indicadores que utiliza el Sistema Ferroviario Mexicano (SFM) para medir la operación y la eficiencia del servicio de pasajeros? Para darle respuesta, se llevó a cabo una investigación.

INDICADORES DE OPERACIÓN DEL TRANSPORTE FERROVIARIO

En México, los indicadores ferroviarios miden el rendimiento y la eficiencia de la red o de una determinada concesión o asignación. Además, permiten identificar los factores que influyen en el desempeño del SFM. Estos indicadores se establecen con base en los materiales y métodos que se describen a continuación (Gobierno de México, 2024).



MATERIALES ESTADÍSTICOS DE INDICADORES Y MÉTODOS DEL TRANSPORTE FERROVIARIO EN MÉXICO

INVESTIGACIÓN

La Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario (ARTF) se encarga de elaborar, registrar y publicar la estadística de los indicadores de los servicios ferroviarios, conforme a lo establecido en la Ley Reglamentaria del Servicio Ferroviario (LRSF). Asimismo, el Reglamento del Servicio Ferroviario (RSF) y su decreto de creación, como órgano desconcentrado de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, publican el Sistema Nacional de Indicadores Ferroviarios (SNIF). En relación con el desempeño del transporte ferroviario de carga y de pasajeros del SFM, se analizan y evalúan los indicadores económicos, operativos, de seguridad y ambientales (Gobierno de México, 2024).

De acuerdo con los principios constituidos en el RSF, esta versión del SNIF se construyó con base en los indicadores señalados en los títulos de concesión y asignación, así como en la investigación de estándares internacionales establecidos en la literatura técnica especializada y científica. En concreto, el SNIF representa una herramienta de gran utilidad para la ARTF; es una fuente de información básica que permite monitorear, evaluar y emitir recomendaciones específicas para implementar acciones que mejoren los estándares de eficiencia y rendimiento en el SFM (Gobierno de México, 2024).

Para contestar la pregunta planteada con anterioridad —¿Cuáles son los indicadores de operación que ha instrumentado el SNIF para medir la operación de los trenes? — fue necesario estudiar la metodología de este sistema. A continuación, se presenta el esquema de la metodología y la determinación de sus indicadores.

MATERIALES Y MÉTODOS

El artículo presenta un enfoque cuantitativo, por lo que se fundamenta en la metodología empírica desarrollada por el SNIF para medir los indicadores de operación ferroviaria. Este diseño se apoya tanto en los reportes emitidos por la ARTF (del Pulso Operativo Mensual, de Seguridad del SFM y del Anuario

Estadístico Ferroviario) como en la información complementaria que los concesionarios y asignatarios presentaron a la ARTF (Gobierno de México, 2024).

El SNIF ha establecido que los principales indicadores para el transporte de personas en el Tren Interurbano son el número de pasajeros, la distancia recorrida y el tiempo de traslado, además de métricas de eficiencia operativa, como el consumo de combustible y la seguridad (Gobierno de México, 2024). La Figura 3 muestra el esquema de la metodología.

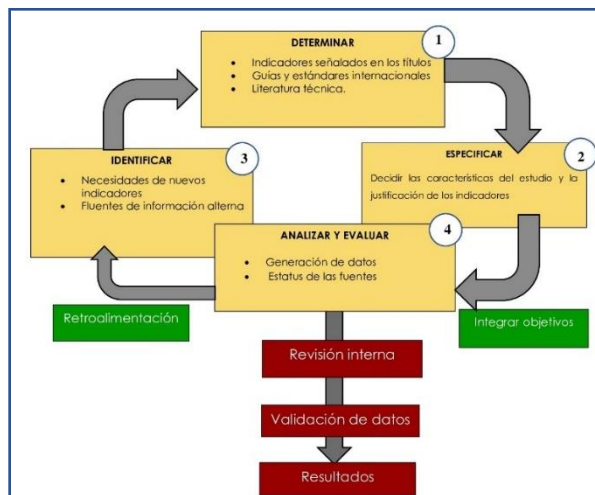


Figura 3.
Sistema de Indicadores
Ferroviarios, 2024.

Para los fines de esta investigación, se estudió la metodología desarrollada por el SNIF (Gobierno de México, 2024), cuyos indicadores se presentan a continuación.

Indicadores para la operación

- 1) Demanda de pasajeros/transportados. Métrica fundamental para medir el uso del servicio.
- 2) Pasajeros por kilómetro. Indica cuántos usuarios son transportados por cada kilómetro de recorrido.
- 3) Distancia recorrida. Distancia total cubierta por el sistema de trenes.

Indicadores de eficiencia del servicio

- 1) Tiempo de traslado. El objetivo principal de proyectos como el Tren Interurbano México-Toluca es reducir el tiempo de viaje.
- 2) Número de viajes por día, semana y mes.
- 3) Velocidad promedio. Velocidad media con la que operan los trenes.
- 4) Ocupación promedio por viaje. Número de pasajeros por tren o convoy en un viaje específico.



Métricas de infraestructura y operación

- 1) Número de trenes en operación. Número de trenes disponibles para la operación.
- 2) Kilómetros de vía. Extensión de la red ferroviaria.
- 3) Consumo de combustible/energía por pasajero-kilómetro. Evalúa la eficiencia energética del servicio.

ANÁLISIS DE INDICADORES DE OPERACIÓN

TRAMO ZINACANTEPEC-SANTA FE

Tras la definición de indicadores, se realizó el análisis del presente trabajo, en dos etapas. En la primera se recopiló información del Tren Interurbano de diversas páginas de internet y en la segunda etapa se obtuvo información *in situ*, en distintos días de la semana, tanto en horas pico como en horas valle. Toda la información se seleccionó y clasificó según los tres grupos de indicadores determinados por el SNIF (Gobierno de México, 2024).

Finalmente, se realizó un análisis comparativo entre la información proporcionada por las fuentes oficiales (Gobierno de México, 2024) y la recabada *in situ*. Los resultados se muestran en las Tablas 1-4.

RESULTADOS

Tabla 1. Indicadores de operación

Indicadores de operación	Cantidad
Longitud	98,978 km
Número de terminales	2
Estaciones intermedias	4
Estación	Zinacantepec
	Pino Suárez
	Meteppec
	Lerma
	Ocoyoacac
	Santa Fe
	Observatorio
Longitud total	98,978 km

Tabla 2. Indicadores de intervalo entre cada tren

Indicadores de operación	Cantidad
Intervalo entre cada tren	4-6 minutos
Demanda de pasajeros/transportados	15,660
Pasajero por kilómetro	260
Distancia recorrida	98,978 km

Tabla 3. Indicadores de eficiencia

Indicadores de eficiencia	Cantidad
Trenes	30
Vagones por tren	1
Velocidad máxima	160 km
Velocidad promedio	90 km
Tiempo de traslado	40 min
Viajes por día	20
Ocupación promedio por viaje	480

Tabla 4. Métricas de infraestructura y operación

Métricas de operación	Cantidad
Trenes en operación	30
Kilómetros de vía	68
Consumo de combustible/energía por pasajero/kilómetro	No hay información

En resumen, las Tablas de la 1 a la 4 muestran la información de los tres grupos de indicadores, tomada de las páginas oficiales del Gobierno Federal, en las que se subraya que el Tren Interurbano transporta a millones de pasajeros. Al respecto, el Gobierno del Estado de México mantiene el mismo discurso.

A continuación, se presenta la segunda etapa del análisis, con información obtenida en las instalaciones del Tren Interurbano México-Toluca en 2025 (Tablas 5-9).

Tabla 5. Indicadores de operación *in situ*

Indicadores de operación	Cantidad
Longitud	57,700
Terminales	Zinacantepec y Santa Fe
Estaciones intermedias	3
Zinacantepec	Inicio
Pino Suárez	6 km
Meteppec	6 km
Lerma	19 km
Ocoyoacac	No hay estación
Santa Fe	27,700
Observatorio	No funciona
Longitud total	57,700

Tabla 6. Indicadores de intervalo entre cada tren *in situ*

Indicadores de operación	Cantidad
Intervalo entre cada tren	30
Demanda de pasajeros/transportados/viaje con 5 vagones	100
Pasajero por kilómetro	No hay información
Distancia recorrida	57,700

Tabla 7. Indicadores de eficiencia

Indicadores de eficiencia	Cantidad
Trenes	8
Vagones por tren	5
Velocidad máxima	80
Velocidad promedio	80
Tiempo de traslado	60 min
Número de viajes por día/semana/mes	10
Ocupación promedio por viaje	200

Tabla 8. Métricas de infraestructura y operación

Métricas de operación	Cantidad
Trenes en operación	8
Kilómetros de vía	57,700
Consumo de combustible/energía por pasajero/km	No hay información

Tabla 9. Indicadores del discurso político contra indicadores *in situ*

Indicadores de eficiencia	Discurso oficial	Indicadores <i>in situ</i>
Distancia total cubierta por el Tren Interurbano	98,978	58,570
Trenes	30	8
Velocidad máxima	160 km	80 km
Velocidad promedio	90 km	70 km
Tiempo de traslado	40 min	60 min de ida 45 min Santa Fe-Toluca
Número de viajes por día	23 mil viajes	No hay información
Ocupación promedio por viaje	15,660	15 personas
	3.3 millones de personas	No hay información
Pasajeros por día en la estación Santa Fe	20 mil	500

DISCUSIÓN

Las ciudades de la Zona Metropolitana de Toluca se están transformando rápidamente; para ello es esencial la conectividad urbana. Los avances de la tecnología y la digitalización permitieron construir un sistema ferroviario de transporte de pasajeros: el Tren Interurbano México-Toluca, cuyo objetivo es modernizar y ampliar la infraestructura ferroviaria y mejorar la conectividad entre Toluca y Ciudad de México.

El discurso político presenta el Tren Interurbano como un servicio de transporte ferroviario con múltiples beneficios: es un tren de alta capacidad y una alternativa superior al sistema de transporte público de pasajeros, lo que permite reducir el tiempo de viaje. Igualmente, es un modo de transporte

rápido, cómodo, accesible, con bajo precio, además de que disminuye el impacto al medio ambiente y es una contención de la expansión urbana.

De la misma manera, se asevera que el tren tiene una longitud de 98,978 kilómetros, cuenta con dos terminales y cuatro estaciones intermedias, y tiene treinta trenes, cada uno con cinco vagones. Funciona a una velocidad promedio de 160 km/h. La estación Santa Fe recibe aproximadamente 20 mil pasajeros diariamente, lo que consolida a este medio de transporte como un eje de conectividad entre las capitales del Estado de México y de la República Mexicana. Además, se estima que más de 10 millones de personas han utilizado el servicio; en el periodo julio-septiembre de 2024, con cuatro trenes en operación, se realizaron 23 mil viajes, lo que equivale a la movilización de 3.3 millones de personas (Gobierno de México, 2015).

Contrariamente, la información obtenida *in situ* permitió constatar que el Tren Interurbano tiene la categoría de tren de baja velocidad, que opera en una longitud de 57.87 km, cuenta con dos terminales y tres estaciones intermedias y funciona a una velocidad promedio de 80 km/h. Asimismo, contabiliza ocho trenes, cada uno con cinco vagones con capacidad para 96 personas. No obstante, la ocupación promedio de un vagón es de solo quince personas; el intervalo entre trenes es de treinta a cuarenta minutos, mientras que el tiempo de traslado es de cincuenta a sesenta minutos. Estos indicadores muestran datos contrarios al discurso oficial.

Aunado a lo anterior, se encontró que el Tren Interurbano no ofrece opciones de precio, puesto que no incluye descuentos para personas de la tercera edad ni preferenciales; la tarifa mínima es de quince pesos y la máxima de noventa.

Para el acceso al tren los usuarios deben utilizar la Tarjeta de Movilidad Integrada o comprar un código QR, ambos de uso personal y disponibles en las estaciones.

Cabe mencionar que el tren no registra correctamente la entrada o la salida de los usuarios, lo que genera una sanción de diez pesos. Lo mismo sucede si se utiliza un código QR, pero si se desciende en una estación diferente a la registrada. La pérdida de este código se sanciona y el incumplimiento de las normas puede derivar en la intervención de las autoridades.

CONCLUSIONES

El análisis de los indicadores de operación, fundamentado en la metodología del SNIF (Gobierno de México, 2024) permitió constatar que el Tren Interurbano México-Toluca tiene la categoría de tren de baja velocidad y opera en una longitud de 57.87 km, de los cuales 37 se encuentran en Estado de México y veinte en Ciudad de México. Cuenta con un tramo de túneles de 5 km, dos terminales y tres estaciones intermedias. Opera a una velocidad promedio de 80 km/h. Ofrece el servicio con ocho trenes y cinco vagones, cada uno con capacidad para 96 plazas, pero la ocupación promedio es de solo quince personas. El intervalo entre trenes es de treinta a cuarenta minutos, tiempo que los usuarios deben esperar. El traslado es de cincuenta a sesenta minutos.

Por ende, el tren debería contar con estrategias para ofrecer un servicio con una serie de ventajas —como la eficiencia energética y el crecimiento económico para la región— y en el que los usuarios experimenten una mayor accesibilidad, lo que lo convertiría en un transporte más atractivo para la población.

Sin embargo, los indicadores de operación obtenidos *in situ* evidencian implicaciones negativas en su planeación y funcionamiento, además de los altos costos de construcción. Si los indicadores de funcionamiento —como la frecuencia y la velocidad a corto plazo— mejoran, se tendrá un servicio más eficiente.

REFERENCIAS

Coespo, Consejo Estatal de Población (2024). Características demográficas de los municipios mexiquenses alrededor del Tren Interurbano México-Toluca (TIMT). [En línea]. Disponible en: <https://sidof.segob.gob.mx/notas/getDoc/5721091>

Gobierno de México (2015). Convenio de coordinación en materia de reasignación de recursos. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/shcp/documentos/convenios-de-coordinacion-en-materia-de-reasignacion-de-recursos>

Gobierno de México (2024). Sistema Nacional de Indicadores Ferroviarios 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/artf/documentos/sistema-nacional-de-indicadores-ferroviarios-2024>

Kone, M.X. (2024). Por qué es importante la conectividad para el flujo urbano. [En línea]. Disponible en: <https://www.kone.mx/blog/conectividad-flujo-urbano.aspx>

OBTENCIÓN DE MATERIALES BASE CELULOSA A PARTIR DE LA BIOMASA *PHRAGMITES AUSTRALIS* PARA LA FABRICACIÓN DE EMBALAJES SOSTENIBLES

PRODUCTION OF CELLULOSE BASED MATERIALS FROM *PHRAGMITES AUSTRALIS* BIOMASS FOR THE MANUFACTURE OF SUSTAINABLE PACKAGING

PACHECO CALERA, Ricardo Fredy ¹

MARTÍNEZ FLORES, Rocío ¹

PAREJA RODRÍGUEZ, Raúl ²

SALAZAR PÉREZ, Javier ³

ALONSO LEMUS, Ivonne Liliana ³

RESUMEN

A nivel global, se produce una gran cantidad de residuos plásticos que persisten en el ambiente y se fragmentan en microplásticos, además de causar efectos tóxicos en la salud humana. Los métodos actuales de gestión de estos residuos, como el vertido en suelos y la quema, liberan contaminantes peligrosos. Por otra parte, la biomasa de *Phragmites australis* (*P. australis*), mejor conocida como carrizo, a nivel internacional, es considerada una especie invasora sin valor comercial ni nutricional. En el presente proyecto se obtienen materiales celulósicos a partir de la biomasa de *P. australis* para la fabricación de embalajes sostenibles. Como punto de partida, se obtuvieron los materiales a base de celulosa de la biomasa mediante un proceso térmico y utilizando como agente activador hidróxido de sodio (NaOH). Los materiales de partida, así como los embalajes obtenidos, se caracterizaron mediante las técnicas de difracción de rayos X, espectroscopía infrarroja, análisis termogravimétrico y microscopía electrónica de barrido para establecer sus propiedades fisicoquímicas. Además, los embalajes resultantes fueron evaluados en pruebas de estabilidad térmica e inflamabilidad, obteniendo resultados superiores en comparación con los embalajes plásticos convencionales. El presente proyecto ofrece una solución viable para la gestión de *P. australis* y contribuye a la reducción de residuos plásticos. Además, fomenta la economía circular en Coahuila, promoviendo prácticas ambientalmente responsables y económicamente escalables.

Palabras clave: biomasa; *Phragmites australis*; estabilidad térmica; embalajes sustentables.

1. Tecnológico Superior de Monclova. Monclova, Coahuila, México

2. Laboratorio de Ciencia de Materiales, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán, México.

3. SECIHTI, Sustentabilidad de los Recursos Naturales y Energía, CINVESTAV. Saltillo, Coahuila, México.

Correspondencia

rocio.mf@monclova.tecnm.mx
https://orcid.org/0000-0002-7696-0433

Fecha de recepción

13 de agosto de 2025.

Fecha de aceptación

5 de enero de 2026.

ABSTRACT

Globally, large amounts of plastic waste are produced, which persist in the environment and fragment into microplastics that cause toxic effects on human health. Current waste management methods, such as dumping and burning, release hazardous pollutants. On the other hand, *Phragmites australis* (*P. australis*) biomass, commonly known as reed, is internationally recognized as an invasive species with no commercial or nutritional value. This project obtains cellulose-based materials from *P. australis* biomass to produce sustainable packaging. Cellulose-based materials were obtained from the biomass by a thermal process using sodium hydroxide (NaOH) as the activating agent. The raw materials and the resulting packaging were characterized using X-ray diffraction, infrared spectroscopy, thermogravimetric analysis, and scanning electron microscopy to determine their physicochemical properties. Furthermore, the resulting packaging was evaluated in thermal stability and flammability tests, obtaining superior results compared to conventional plastic packaging. This project offers a viable solution for managing *P. australis*, thereby reducing plastic waste. Furthermore, it fosters the circular economy in Coahuila, promoting environmentally responsible and economically scalable practices.

Keywords: biomass; *Phragmites australis*; thermal stability; sustainable packaging.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, debido al auge de las ventas en plataformas digitales, la entrega de productos mediante paquetería ha experimentado un incremento significativo, y el plástico es uno de los materiales más utilizados en el sector de embalaje. Se reporta que entre el veinte y el treinta por ciento de los residuos encontrados en los vertederos municipales son de plástico (Mai y col., 2022). Los cuales pueden permanecer en el ambiente durante grandes intervalos de tiempo o degradarse con el medio ambiente, provocando su fragmentación en partículas más pequeñas (microplásticos) que, al ser ingeridas por los seres humanos, causan severos efectos toxicológicos (Luo y col., 2025). Ante este panorama, surge la necesidad de desarrollar materiales

amigables con el medio ambiente y que cubran las necesidades de la industria del embalaje. Investigaciones recientes han reportado la extracción de celulosa, materia prima para el desarrollo de materiales de embalaje, a partir de distintas biomásas. Por ejemplo, en el trabajo presentado por Aldosari y colaboradores se logró obtener celulosa mediante procesos químicos a partir de vainas de *Astragalus armatus*, mediante procesos alcalinos y de blanqueo. En estudios de descomposición térmica se encontró que la celulosa obtenida mediante agentes químicos presenta una mayor estabilidad térmica que la biomasa sin procesamiento químico (Aldosari y col., 2023). Otro grupo de investigadores logró extraer microfibras naturales a base de celulosa mediante un proceso económico y medioambientalmente sostenible denominado purificación, a partir de los residuos de fibras de mesocarpio de palma aceitera y de hojas de piña (Anukwah y Gadzekpo, 2024). Recientemente, un estudio comparó los resultados con los de diversas fibras lignocelulósicas para determinar su contenido como refuerzos de compuestos poliméricos. El análisis químico confirma la presencia de $37.43 \pm 1.40\%$ de celulosa, $31.06 \pm 1.03\%$ de hemicelulosa y $28.42 \pm 0.81\%$ de lignina en las fibras de caña de *Calamus tenuis*. Además, el análisis termogravimétrico asegura que las fibras de caña son termoestables hasta $210 \pm 5^\circ\text{C}$ (Arup y Dip, 2023).

En la Tabla 1 se presentan diferentes metodologías reportadas para la extracción de celulosa a partir de diversas biomásas. Se puede observar que se utilizan agentes modificadores reactivos básicos o sustancias peligrosas para el medio ambiente. En la metodología propuesta en el presente estudio para la fabricación de embalajes ecológicos, un producto final, no se utilizan componentes tóxicos y el tiempo de tratamiento térmico es de solo dos horas. Se propone una alternativa sostenible para la fabricación de embalajes ecológicos y de valor agregado mediante la celulosa extraída de la biomasa de *P. australis*. El proceso se basa en un tratamiento térmico a baja temperatura, complementado con NaOH como agente activador. El uso de esta sustancia en grado comercial representa una ventaja significativa, ya que es un reactivo de bajo costo, ampliamente disponible y eficaz para promover la disrupción estructural y la activación química de la celulosa. A su vez, *P. australis*, gracias a su crecimiento acelerado y a su alta producción de biomasa, se ha consolidado como una fuente prometedora de celulosa, con proporciones de aproximadamente treinta a cuarenta por ciento en masa (Herrera-Zamora y col., 2023; Pareja-Rodríguez y col., 2025), capaz de impulsar alternativas más sostenibles tanto en la industria del papel como en diversos bioprocesos.



Tabla 1. Análisis del estado de los trabajos académicos reportados sobre la extracción de celulosa a partir de diferentes biomasas.

Biomasa	Procesamiento	Aplicaciones	Ref/Año
<i>Arenga Pinnata</i> (Palma de azúcar)	-Alcalinización -Blanqueo	NR	Yuanita y col., 2024.
Tallo de plátano	-Asistente de microondas -Agitación magnética	Productos industriales	Thi Thuy Van y col., 2022.
<i>Astragalus armatus</i> (Planta leguminosa)	-Blanqueo -Mezcla de ácido acético glacial y peróxido de hidrógeno	Biosorción de azul de metileno	Aldosari y col., 2023.
Palma aceitera y hojas de piña	-Lavado con agua del grifo y hervido -Secadas en el horno -Filtrado del NaOH -Lavado con agua desionizada -Blanqueado por inmersión -Agitación periódica	Soportes porosos	Anukwah y Gadzekpo, 2024.
<i>Calamus tenuis</i>	-Sumergido en agua - Lavado en agua destilada	NR	(Arup Kar y Dip, 2023)
<i>P. australis</i>	- Lavado con agua del grifo y hervido a reflujo -Alcalinización con NaOH -Blanqueo con H ₂ O ₂ - Lavado con agua destilada	Remoción de azul de metileno	Başaran y Metin, 2020.
<i>P. australis</i>	-Proceso de calentamiento -Activación química -Trituración -Vertido en moldes -Secado -Desmoldeo	Fabricación de embalajes sustentables	Este trabajo

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 OBTENCIÓN DE MATERIALES A BASE DE CELULOSA Y FABRICACIÓN DE EMBALAJES SUSTENTABLES

La etapa experimental comenzó con la recolección de la materia prima, *P. australis*, en la zona del Río Monclova, Coahuila (26°55'46.9"N



101°24'40.8"W). La biomasa recolectada se cortó en segmentos de aproximadamente 2 cm de longitud. A continuación, se pesaron 500 g de biomasa y se colocaron en un recipiente metálico junto con 1 L de agua potable. Después, la mezcla se sometió a un proceso térmico a 90 °C durante 30 min y, posteriormente, se realizó la activación química mediante la adición de 500 mL de una disolución de NaOH a 1 M (grado comercial). La mezcla se mantuvo a 90 °C durante una hora para favorecer la descomposición parcial de los componentes no celulósicos. Enseguida del tratamiento alcalino, el material se trituyó durante dos minutos con un procesador de alimentos (Nutribullet®) para obtener una mezcla homogénea. Esta mezcla se vertió en moldes que fueron secados al sol durante aproximadamente tres horas. Se procedió con la etapa de desmoldeo del material.

2.2 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

Los materiales obtenidos se caracterizaron mediante las técnicas de difracción de rayos X (DRX) en el equipo Bruker modelo D8 Advance (Cu K α , λ = 0.154184 nm), espectroscopia infrarroja (FTIR) Frontier FT-IR/NIR con una velocidad de barrido 0.2 en un intervalo de 4000-450 cm⁻¹ y con número de onda de IR-Laser 15798.00. Análisis termogravimétrico (TGA-DSC) Thermal modelo SDT Q 600 en un rango de temperatura de 25-700 °C, atmósfera de aire a 100 mL/min y una rampa de calentamiento de 10 °C/min. Microscopio electrónico de barrido (MEB) marca Philips modelo XL30 ESEM. La prueba de inflamabilidad se realizó encendiendo directamente un *pellet* de embalaje plástico (Poliestireno expandido) y un *pellet* base de celulosa, ambos con geometría cilíndrica y dimensiones de 2 cm de diámetro por 2 cm de alto.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presenta la descripción de las micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica, que permiten analizar en detalle la evolución morfológica de la biomasa de *P. australis* durante el proceso de producción. En la Figura 1 se observan las imágenes de MEB que revelan la morfología de las muestras a diferentes escalas de magnificación, desde una vista macroscópica (3 mm) hasta detalles estructurales (20 μ m). Las imágenes de baja magnificación (1a y 1e) muestran la estructura general del material y

exhiben una superficie heterogénea con morfología fibrosa. Al aumentar la magnificación (b/f: 100 μm ; c/g y d/h: 20 μm), se aprecia con mayor detalle la organización de las fibras individuales, que forman una red interconectada. Particularmente, en las imágenes de mayor resolución (20 μm) se distinguen las características superficiales de las fibras, incluida su textura porosa. Si bien el procesamiento induce fracturas en la estructura de las fibras de celulosa, lo que resulta en un material más moldeable, se mantiene la arquitectura fibrosa jerárquica característica de este tipo de materiales lignocelulósicos, lo cual coincide con resultados previamente reportados (Başaran y Metin, 2020). Esta modificación controlada de la estructura, que preserva la porosidad intrínseca mientras altera la integridad fibrilar, resulta particularmente relevante para aplicaciones tecnológicas donde se requieren materiales con mayor capacidad de conformado.

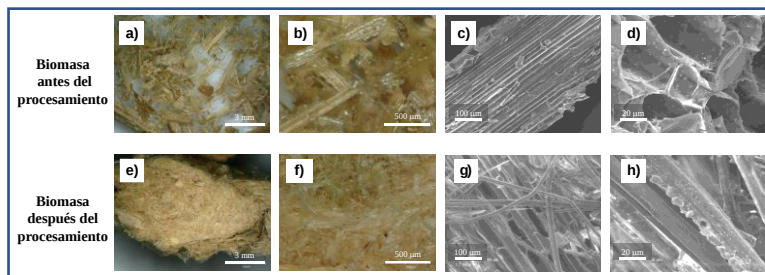


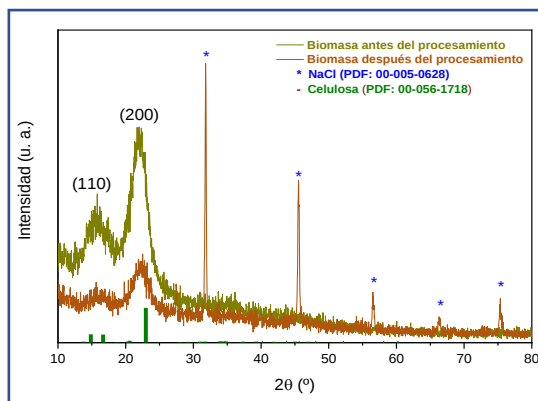
Figura 1. Imágenes de microscopía óptica (a, b, e y f) y microscopía electrónica de barrido (c, d, g y h) de la biomasa de *P. australis* antes y después del proceso de producción.

En la Figura 2 se presentan los patrones DRX de la biomasa antes y después del procesamiento, así como la carta cristalográfica (PDF: 00-056-1718) de la celulosa I. Este análisis se realizó con la finalidad de comprobar que efectivamente se estuviera obteniendo materiales a base de celulosa.

En el difractograma previo al procesamiento, se observan dos señales a $2\theta = 16^\circ$ y 22° , asociadas a los planos (110) y (002) de la estructura cristalina monoclinica de la celulosa (Başaran y Metin, 2020; El Allaoui y col., 2023). Durante el tratamiento con NaOH, la disminución de la intensidad de los picos de celulosa en el difractograma de rayos X se debe principalmente a la molienda mecánica, que transforma la celulosa I (altamente cristalina) en celulosa II (menos ordenada), lo que reduce su cristalinidad.

Además, el NaOH rompe puentes de hidrógeno, hincha las fibras y solubiliza componentes amorfos como la hemicelulosa y la lignina, lo que contribuye a una menor intensidad de las señales asociadas a la estructura cristalina original (Stanciu y col., 2025).

Figura 2. Difractograma de la biomasa antes y después del procesamiento.



Los resultados obtenidos en el tratamiento alcalino de *P. australis* coinciden con los reportados por Rico del Cerro y col. (2020) y Thielemans y col. (2023), donde se reporta la disminución de la cristalinidad de la celulosa tras diferentes tratamientos (como el uso de líquidos iónicos e hidrólisis ácida), lo que incrementa su reactividad química y su susceptibilidad a la hidrólisis enzimática; sin embargo, estos estudios emplean sistemas enzimáticos más complejos y tratamientos combinados para lograr una despolimerización más eficiente. Asimismo, en la muestra posterior al procesamiento se pueden detectar picos en 32, 46, 56, 66 y 75° que corresponden a la fase cristalina del NaCl (PDF: 00-005-0628) (Tounsadi y col., 2020), lo que indica la presencia de residuos provenientes del tratamiento alcalino con NaOH.

Los resultados de las pruebas para evaluar la estabilidad térmica de los embalajes se realizaron mediante estudios termogravimétricos, en la Figura 3 se presenta el termograma y su primera derivada (dm/dT) del material base de celulosa obtenido. El perfil termogravimétrico, muestra cuatro etapas principales de pérdida de masa asociadas a los procesos de descomposición. En la primera (25–105 °C), se observa una pérdida de masa moderada (11%), asociada a la evaporación de humedad adsorbida en la estructura del material, un fenómeno común en biopolímeros y biomateriales. Entre 200 y 320 °C, ocurre la descomposición simultánea de hemicelulosa y celulosa, generando la mayor pérdida de masa (38 % en el ejemplo).

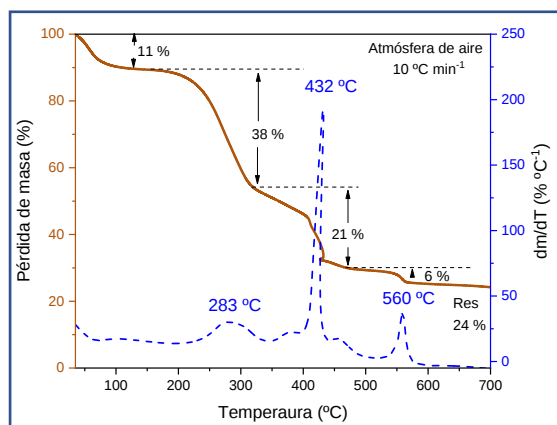


Figura 3. Termograma del embalaje a base de celulosa obtenido.

Esta etapa refleja la ruptura de los enlaces glucosídicos y la degradación de los componentes principales de la matriz lignocelulósica. Posteriormente, en el rango de 320-475 °C, la pérdida de masa continúa (21%) se debe a la descomposición de residuos de celulosa y lignina, junto con procesos de oxidación acelerados por la atmósfera de aire. Durante esta fase, la lignina, más termoestable, se degrada parcialmente, liberando

compuestos volátiles y dejando residuos carbonosos. Finalmente, por encima de 475 °C, se produce la descomposición de los restos de lignina y alquitraneos formados durante el tratamiento térmico, culminando en un residuo estable (~24 %) a 700 °C. Este residuo contiene fundamentalmente estructuras carbonosas oxidadas y cenizas (como NaCl y, en menor proporción, silicatos y carbonatos), lo cual coincide con los resultados de DRX anteriores.

El análisis termogravimétrico demuestra que el material en estudio presenta una notable estabilidad térmica hasta 200 °C, con una pérdida de masa mínima por debajo de 100 °C. Esta resistencia al calor (comparable a otros polímeros sintéticos comerciales como poliestireno), combinada con su naturaleza biodegradable, lo hace particularmente adecuado para aplicaciones como envases alimentarios para productos calientes (tazas, recipientes de comida) donde las temperaturas no superan los 180 °C, así como para materiales de aislamiento térmico en construcción (paneles aislantes, revestimientos) donde se requiera protección contra temperaturas moderadas. Su comportamiento térmico predecible y origen sostenible lo posicionan como una alternativa ecológica frente a materiales sintéticos convencionales en estas aplicaciones.



Los espectros FTIR de la biomasa antes y después del tratamiento con NaOH se muestran en la Figura 4, los cuales presentan una notable similitud en la posición y la intensidad de los principales picos, lo que indica que no ocurren cambios estructurales significativos entre la biomasa de partida y el material base de celulosa. En ambos casos se observa una banda ancha alrededor de 3340 cm^{-1} , atribuida a los grupos -OH presentes en la celulosa y la lignina; señales en 2918 y 2848 cm^{-1} asociadas a estiramientos C-H de grupos metilo y metileno; un pico en 1635 cm^{-1} correspondiente a los grupos carbonilo (C=O) de la hemicelulosa, cabe resaltar la disminución en la intensidad de este pico debido a la hidrólisis básica; otro en 1425 cm^{-1} relacionado con las deformaciones de los grupos -CH_2 y -CH_3 ; y una señal intensa alrededor de 1030 cm^{-1} debida a enlaces C-O y C-C en polisacáridos. La persistencia de estos picos sugiere que el tratamiento alcalino no altera sustancialmente la estructura química general de la biomasa, aunque sí se ha observado, según estudios de DRX previamente realizados, una disminución de la cristalinidad de la celulosa. Esto es coherente con la acción del NaOH, que puede desorganizar la estructura cristalina de la celulosa al romper parcialmente los enlaces de hidrógeno entre las cadenas celulósicas, sin modificar significativamente su composición funcional.

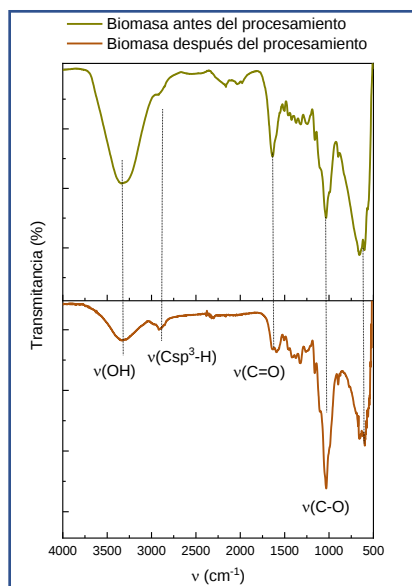


Figura 4. Espectros FTIR de la biomasa antes y después del procesamiento.

Finalmente, para evaluar la inflamabilidad del material base de celulosa y de un embalaje comercial de plástico, se realizó la prueba de ignición, cuyos resultados se muestran en la Figura 5. La prueba de ignición muestra una comparación visual del comportamiento ante la llama de dos tipos de materiales utilizados como embalaje: un embalaje plástico comercial y un embalaje de base de celulosa. En la fila superior se observa que la muestra de plástico, al entrar en contacto con la llama, comienza a deformarse rápidamente y desarrolla una flama sostenida a partir de los 4 s. A partir de ese momento, la combustión progresa de manera acelerada, con un derretimiento visible y una flama intensa que consume casi por completo el

material. El proceso total de combustión dura aproximadamente 10 s, lo que evidencia su alta inflamabilidad y su incapacidad para autoextinguirse.

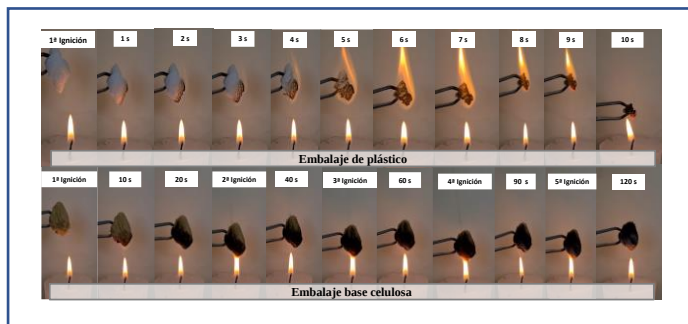


Figura 5. Prueba de inflamabilidad de embalajes de plástico y de materiales a base de celulosa.

En contraste, la secuencia correspondiente al embalaje de base de celulosa (fila inferior) muestra un comportamiento significativamente más seguro: aunque el material se oscurece y carboniza en la superficie, no logra sostener una flama estable, y a los 20 s se autoextingue por completo; incluso después de cinco intentos de ignición en distintos momentos (40, 60, 90 y 120 s), no desarrolla una combustión persistente. Este comportamiento refleja una baja inflamabilidad y una destacada capacidad de autoextinción, asociadas tanto a la formación de una capa carbonosa que limita el avance del fuego como a la presencia residual de NaCl y otras sales inorgánicas, como se aprecia en las Figuras 2 y 3, estas sustancias actúan como retardantes de llama al absorber calor, favorecer la carbonización y dificultar la generación de gases combustibles, contribuyendo así a inhibir la propagación de la flama. En conjunto, se evidencia que el embalaje plástico presenta un riesgo de combustión elevado, mientras que el embalaje de base de celulosa demuestra un comportamiento mucho más seguro frente al fuego.

CONCLUSIONES

Mediante el presente proyecto se logró desarrollar una metodología simple, escalable y amigable con el medio ambiente para obtención de materiales base celulosa a partir de la biomasa *P. australis* mediante un procesamiento térmico y activación química. Los resultados de las pruebas de DRX indican que la estructura cristalina del material tras el procesamiento corresponde a la de



la celulosa, con una menor cristalinidad, mientras que los resultados de FTIR confirman que el tratamiento en medio básico no genera cambios estructurales significativos en la biomasa. Los resultados de la prueba del análisis termogravimétrico realizada al material obtenido indican que presenta una estabilidad térmica hasta ~200 °C superior a la de ciertos polímeros comerciales como el polietileno, ampliamente utilizado en la industria del embalaje. Además, el embalaje base de celulosa presenta una baja inflamabilidad y una destacada capacidad de autoextinción. En conclusión, el presente proyecto representa un paso significativo hacia soluciones de embalaje más sostenibles con un alto potencial para reemplazar materiales contaminantes.

AGRADECIMIENTOS

El grupo de investigadores agradece al Instituto Tecnológico Superior de Monclova y al laboratorio de Sustentabilidad de los Recursos Naturales y Energía, CINVESTAV Unidad Saltillo, por el apoyo y las facilidades brindados en la realización de esta investigación.

REFERENCIAS

- Aldosari, O. F., Jabli, M. & Morad, M. H. (2023). Chemical extraction of cellulose from Ligno-cellulosic *Astragalus armatus* pods: Characterization, and application to the biosorption of methylene blue. *Arabian Journal of Chemistry*, 16(8): 105019. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.105019>
- Anukwah, G. D. & Gadzekpo, V. P. Y. (2024). Production of natural cellulose-based microfibrils, from oil palm mesocarp fibres and pineapple leaf wastes, as porous supports for further applications. *Heliyon*, 10(18): e16491. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37701>
- Arup Kar & Dip S. (2023). Characterization of new natural cellulosic fiber from *Calamus tenuis* (Jati Bet) cane as a potential reinforcement for polymer composites. *Heliyon*, 9(6): 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16491>

- Başaran Kankılıç, G. & Metin, A. Ü. (2020). *Phragmites australis* as a new cellulose source: Extraction, characterization and adsorption of methylene blue. *Journal of Molecular Liquids*, 312: 113313. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113313>
- Del Cerro, D. R., Koso, T. V., Kakko, T., King, A. W. T., & Kilpeläinen, I. (2020). Crystallinity reduction and enhancement in the chemical reactivity of cellulose by non-dissolving pre-treatment with tetrabutylphosphonium acetate. *Cellulose*, 27(10): 5545–5562. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03044-6>
- El Allaoui, B., Chakhtouna, H., Zari, N., Benzeid, H., Qaiss, A. el K., & Bouhfid, R. (2023). Superhydrophobic alkylsilane functionalized cellulose beads for efficient oil/water separation. *Journal of Water Process Engineering*, 54: 104015. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104015>
- Herrera-Zamora, D. M., Pareja-Rodríguez, R., Ruiz-Gómez, M., González-Gómez, W. S., Velasco-Arias, D., García-Valladares, O., Escobar, S., Rodríguez-Gattorno, G. & Martínez-Flores, R. (2023). Dispersibility study of GO-like biocarbons obtained from the thermal decomposition of biomass: *Phragmites australis* and *Carya illinoensis*. *Biomass and Bioenergy*, 172: 106749. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106749>
- Luo, Q., Tan, H., Ye, M., Jho, E. H., Wang, P., Iqbal, B., Zhao, X., Shi, H., Lu, H. & Li, G. (2025). Microplastics as an emerging threat to human health: An overview of potential health impacts. *Journal of Environmental Management*, 387: 125915. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125915>
- Mai, L., He, H. & Zeng, E. Y. (2022). Plastic pollution in waterways and in the oceans. T. M. Letcher, Water and Climate Change Sustainable Development, Environmental and Policy Issues (pp.179-195). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99875-8.00008-2>
- Pareja-Rodríguez, R., Torres-García, E., Martínez-Flores, R. & Rodríguez-Gattorno, G. (2025). The role of autogenous atmosphere during graphene-like materials formation from biomass: a case study from *Phragmites australis*, thermokinetic study and structural evolution. *Materials Today Communications*, 45: 112156. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.112156>
- Stanciu, M.-C., Tanasă, F. & Teacă, C.-A. (2025). Crystallinity Changes in Modified Cellulose Substrates Evidenced by Spectral and X-Ray Diffraction Data. *Polysaccharides*, 6(30): 2-32. <https://doi.org/10.3390/polysaccharides6020030>
- Thi Thuy Van, N., Gaspillo, P. asa, Thanh, H. G. T., Nhi, N. H. T., Long, H. N., Tri, N., Thi Truc Van, N., Nguyen, T. T. & Ky Phuong Ha, H. (2022). Cellulose from the banana stem: optimization of extraction by response surface methodology (RSM) and characterization. *Heliyon*, 8(12): e11845. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11845>
- Thielemans, K., De Bondt, Y., Comer, L., Raes, J., Everaert, N., Sels, B. F., & Courtin, C. M. (2023). Decreasing the Crystallinity and Degree of Polymerization of Cellulose

Increases Its Susceptibility to Enzymatic Hydrolysis and Fermentation by Colon Microbiota. *Foods*, 12(5): 1100. <https://doi.org/10.3390/foods12051100>

Tounsadi, H., Metarfi, Y., Barka, N., Taleb, M. & Rais, Z. (2020). Removal of Textile Dyes by Chemically Treated Sawdust of Acacia: Kinetic and Equilibrium Studies. *Journal of Chemistry*, 2020: 234218. <https://doi.org/10.1155/2020/7234218>

Yuanita, E., Nugraha, A. F., Jumahat, A., Mochtar, M. A. & Chalid, M. (2024). Extraction of Cellulose from *Arenga Pinnata* "Ijuk" Fiber for Polypropylene Composite: Effect of Multistage Chemical Treatment on the Crystallinity and Thermal Behaviour of Composite. *South African Journal of Chemical Engineering*, 48: 112–120. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2024.01.010>

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL ÁREA DEL TRAZADOR EN TRES DISTRIBUIDORES CON INTERIOR PARALELEPIPÉDICO MEDIANTE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE TRACER AREA IN THREE TUNDISHES WITH REGULAR PARALLELEPIPED GEOMETRY USING IMAGE PROCESSING

CERRITOS ARRIAGA, Ma. de Lourdes ¹

RODRÍGUEZ ÁVILA, Jafeth ¹

MORALES DÁVILA, Rodolfo C. ²

GÓMEZ CASAS, Josué ¹

OLVERA ROMERO, Gerardo Daniel ¹

RESUMEN

La colada continua requiere un control preciso del flujo en el distribuidor para homogenizar el acero líquido y favorecer la flotación de inclusiones. Este comportamiento se evalúa mediante las curvas de distribución de tiempos de residencia (RTD) y el mínimo tiempo de residencia (MRT), los cuales permiten identificar los regímenes y trayectorias del flujo. En este estudio se propone un método experimental alternativo basado en la inyección de trazadores de color y el procesamiento de video, con el objetivo de analizar la evolución del área del trazador durante el MRT y su relación con la separación de impurezas. Se empleó un modelo físico en acrílico a escala 1:3, diseñado bajo el criterio de similitud de Froude, con un caudal de 13 L/min y registro a treinta cuadros por segundo. Adicionalmente, se compararon tres inhibidores de turbulencia con geometría paralelepípeda regular y diferentes proporciones internas. Asimismo, se realizaron ensayos con polvo de densidad relativa menor que la del agua para representar inclusiones no metálicas y validar las tendencias observadas. En cuanto a los resultados, se pudo ver un avance inicial semejante del trazador en los tres casos y diferencias significativas en la etapa final. El inhibidor C7 presentó el mejor desempeño, con un MRT de 52 s y 1.65 g de polvo arrastrado, seguido de C6 con 56 s y 2.76 g, mientras que C3 fue el menos eficiente con 55 s y 3.2 g. El análisis de aceleración demostró que los inhibidores actúan como amortiguadores hidráulicos que reducen las fluctuaciones y estabilizan el flujo.

Palabras clave: procesamiento de imágenes; colada continua; inhibidor de turbulencia.

1. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Coahuila. Saltillo, Coahuila, México.
2. Escuela Superior de Química e Industrias Extractivas, Instituto Politécnico Nacional. Ciudad de México, México.

Correspondencia
jafethrodriguez@uadec.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0002-8873-5882>
Fecha de recepción
21 de octubre de 2025.
Fecha de aceptación
20 de abril de 2026.

ABSTRACT

Continuous casting requires precise flow control within the tundish to homogenize the molten steel and promote the flotation of inclusions. This behavior is evaluated through residence time distribution (RTD) curves and minimum residence time (MRT), which allow identifying the flow regimes and trajectories. This study proposes an alternative experimental method based on dye tracer (tracer) injection and video processing, aimed at analyzing the evolution of the tracer area during the MRT and its relationship with impurity separation. A physical acrylic model at a 1:3 scale was used, designed under the Froude similarity criterion, with a flow rate of 13 L/min and recorded at 30 frames per second. Additionally, three turbulence inhibitors with regular parallelepiped geometry and different internal proportions were compared. Tests with powder of relative density lower than that of water were also carried out to represent non-metallic inclusions and validate the observed trends. The tracer exhibited a similar initial propagation in all cases and significant differences at the final stage. Inhibitor C7 exhibited the best performance, with an MRT of 52 s and 1.65 g of powder carried over, followed by C6 with 56 s and 2.76 g, while C3 was the least efficient, with 55 s and 3.2 g. The acceleration analysis demonstrated that the inhibitors act as hydraulic dampers, reducing fluctuations and stabilizing the flow.

Keywords: image processing; continuous casting; turbulence inhibitor.

INTRODUCCIÓN

El acero es un material esencial en la industria moderna por su uso en construcciones, maquinaria e infraestructura. Para obtener las propiedades mecánicas deseadas es necesario controlar las inclusiones no metálicas como óxidos, sulfuros y partículas refractarias que afectan la resistencia, la ductilidad y la durabilidad del material. Estas impurezas generan rechazos, reprocesos y mayores costos en la producción (Ding y col., 2023; Fang y col., 2020; Sheng y Yue, 2020; Yi y col., 2023). En el proceso de colada continua, después de la refinación secundaria, el metal fundido se conduce al distribuidor, cuya función es estabilizar el flujo, mantener una temperatura y composición uniformes y retener las inclusiones antes del vaciado al molde. Aunque las

partículas menos densas tienden a flotar, la turbulencia y las zonas de recirculación pueden arrastrarlas hacia la salida y comprometer la limpieza del acero (Ding y col., 2023; Sahai, 2016; Sahai y Emi, 2007). La Figura 1 muestra las etapas principales del proceso de colada continua.

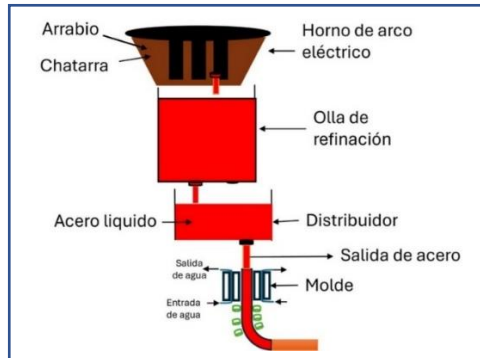


Figura 1. Etapas principales del proceso de colada continua.

Para analizar la dinámica del flujo en el distribuidor se emplea la distribución de tiempos de residencia (RTD), que consiste en introducir un trazador y medir su concentración a la salida para obtener una curva normalizada de área unitaria. Esta permite identificar flujos tipo pistón, de mezcla o zonas muertas (Aguilar-Rodríguez y col., 2018; Chattopadhyay y col., 2010). Un flujo tipo pistón predominante y un menor volumen muerto favorecen la eliminación de inclusiones (Wang y col., 2022). La Figura 2 muestra un experimento típico de RTD.

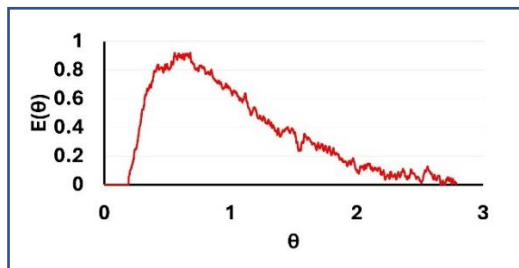


Figura 2. Experimento típico de la curva RTD.

El mínimo tiempo de residencia (MRT) corresponde al intervalo entre la inyección del trazador y su primera detección en la salida, lo que revela trayectorias directas del flujo, aunque no describe por completo su comportamiento (Tie y col., 2022). El método clásico no permite visualizar la distribución espacial del trazador, por lo que se ha incorporado el análisis de video para obtener la evolución del área, el centroide y la dirección de avance del trazador (Singh y col., 2023).



En este estudio se comparan tres geometrías paralelepípedicas de inhibidores de turbulencia con distintas dimensiones. Además, se realizaron ensayos con polvo de baja densidad para simular inclusiones no metálicas y validar los patrones observados. La combinación del análisis visual y experimental evidencia cómo las proporciones internas del inhibidor afectan la circulación y el balance energético del flujo, aportando criterios para optimizar la homogeneidad del acero y favorecer la flotación de inclusiones. Este enfoque experimental, basado en técnicas no invasivas de análisis visual, representa una herramienta de alto potencial para la evaluación y optimización del desempeño hidráulico del tundish en condiciones cercanas a la operación industrial, contribuyendo al mejoramiento de la limpieza del acero durante la colada continua (Aguilar-Rodríguez y col., 2018; Chang y col., 2023; Chattopadhyay y col., 2010; Ding y col., 2023; Sahai y Emi, 2007; Wang y col., 2022).

MATERIALES Y MÉTODOS

El sistema hidráulico experimental se diseñó para reproducir el flujo en un distribuidor industrial de colada continua mediante un modelo físico a escala reducida. El montaje incluyó un depósito de 1000 litros a 5 metros de altura alimentado por una bomba centrífuga de 1 HP. El caudal se controló con un flujómetro y se fijó en 13 L/min conforme al criterio de Froude, garantizando la similitud dinámica con el prototipo real (Mazumdar y Guthrie, 1999). Se utilizó trazador vegetal a 78 g/L como trazador, inyectado en la parte superior de la boquilla de entrada. Las pruebas se grabaron con una cámara HD a treinta cuadros por segundo y los videos se analizaron para obtener variables cinemáticas. El modelo del distribuidor se fabricó en acrílico

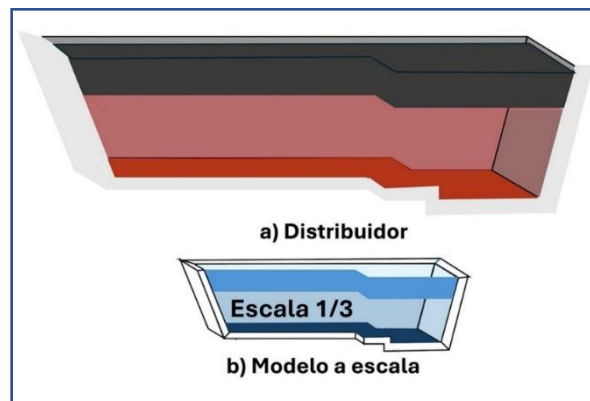


Figura 3. Distribuidor con a) acero líquido en planta y b) modelo a escala 1:3.

transparente a una escala 1:3, manteniendo la similitud de Froude. En la Figura 3 se compara el distribuidor industrial con el modelo experimental. La similitud se basó en la viscosidad cinemática, ya que el agua a 20 °C presenta $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ y el acero líquido a 1600 °C, $0.9 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, lo que permitió reproducir adecuadamente la resistencia al movimiento del fluido. Se estudiaron tres configuraciones experimentales, C3, C6 y C7, con geometría paralelepípedica regular, para evaluar el efecto de las dimensiones internas del inhibidor sobre el flujo y la eficiencia de separación de inclusiones. La Figura 4 muestra las formas experimentales analizadas.

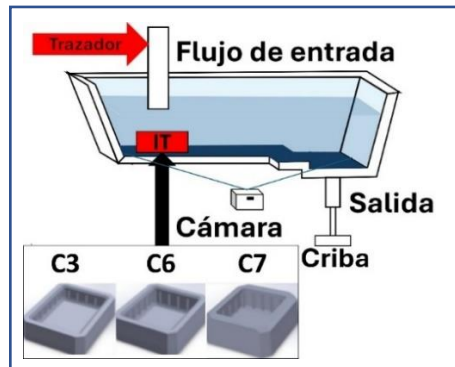


Figura 4. Forma experimental de los casos C3, C6 y C7.

Se realizaron dos ensayos. En el primero se inyectó un trazador líquido para analizar la cinemática del flujo y la dispersión del trazador dentro del distribuidor. En el segundo se usó polvo sólido con densidad relativa de $\rho = 0.98$, menor que la del agua, para simular inclusiones no metálicas que tienden a flotar y quedar atrapadas en la escoria del proceso real. El polvo se diluyó en alcohol y se inyectó por la misma boquilla del trazador. En la salida se colocó una malla metálica de $5000 \mu\text{m}$ que retuvo las partículas. El material recuperado se secó y pesó para determinar la masa que logró salir del sistema, lo que permitió evaluar la eficiencia de cada inhibidor en la flotación de inclusiones, considerando que la fracción retenida equivale a las partículas que en el proceso real ascenderían a la capa de escoria (Quan y col., 2023).

Las áreas cubiertas por el trazador se obtuvieron mediante procesamiento digital de imágenes, empleando algoritmos de segmentación de color y análisis morfológico para identificar y cuantificar la región ocupada por el trazador en cada cuadro del video. Este procedimiento permitió determinar la evolución temporal del área, su expansión y la dirección del flujo, así como calcular la velocidad, la aceleración del área y el mínimo tiempo de residencia en los tres casos analizados. Este método permitió cuantificar la evolución del

trazador, su expansión y la dirección del flujo, además de calcular la velocidad, la aceleración del área y el mínimo tiempo de residencia en los tres casos analizados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 5 se muestran los resultados obtenidos para los inhibidores de turbulencia con geometría regular de paralelepípedo C3, C6 y C7, en diferentes intervalos de tiempo: 1, 2, 3, 5, 7 y 10 segundos después de la inyección del trazador. En esta secuencia se aprecia cómo evoluciona la mancha del trazador durante los primeros 10 segundos, donde se identifican contrastes y pequeñas diferencias en el área cubierta por el trazador entre las distintas configuraciones.

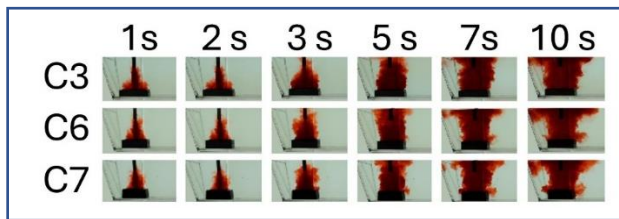


Figura 5. Imágenes experimentales de los primeros 10 s de inhibidores de paralelepípedo regular C3, C6 y C7.

En la Figura 6, cada tono de color corresponde a un segundo de avance del trazador, acumulando un total de 50 s. Conforme transcurre el tiempo, el ritmo de desplazamiento del trazador disminuye y en la zona roja se observa su comportamiento próximo a la salida. En la zona media entre los 20 y los 40 s, de los tres casos, el trazador tiende a avanzar de arriba hacia abajo y hacia la derecha, con un movimiento lento en la parte inferior. La evolución espacial de esta propagación se aprecia con mayor claridad en la Figura 7, donde se muestra el área proyectada del trazador a lo largo del experimento.

Las diferencias entre los inhibidores con forma paralelepipedica se presentan principalmente al final del experimento. En C3, con un MRT de 55 s, el trazador avanza hacia la parte inferior y muestra mayor arrastre de inclusiones. En C6, con 56 s, el flujo es más lento en la zona media pero más horizontal en la parte baja, lo que favorece el transporte de impurezas.



En C7, con 52 s, el flujo es más uniforme y lento, con menor presencia de trazador, lo que indica un arrastre reducido. En la Figura 8 se observa que, aunque el avance inicial del trazador es semejante en los tres casos, con el tiempo se desarrollan diferencias claras en su propagación. El caso C3 presenta una mayor expansión del trazador, mientras que C7 muestra el comportamiento más contenido, lo que se asocia con un menor arrastre de partículas y una mayor eficiencia en la flotación de inclusiones.

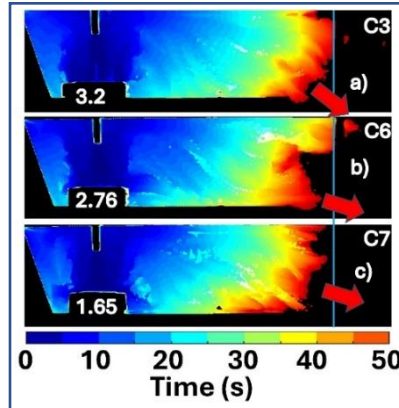


Figura 6. Posición del trazador cada segundo de los casos C3, C6 y C7.

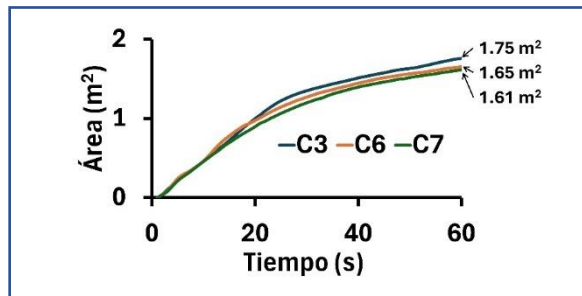


Figura 7. Área del trazador proyectada.

Los resultados indican que un mayor avance del trazador se asocia con un mayor arrastre de partículas y una menor eficiencia en la flotación de inclusiones. El caso C3 permite una salida más rápida de impurezas y un menor tiempo de permanencia en el distribuidor. La comparación se realizó entre inhibidores con la misma forma paralelepípedica, ya que la geometría

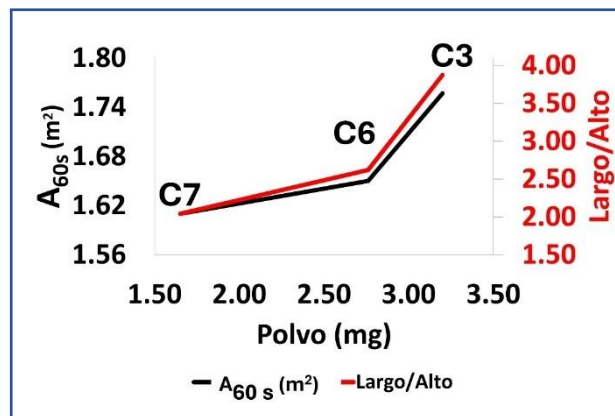


Figura 8. Relación Largo/Alto del inhibidor, área del trazador y masa de polvo colectada de los casos C3, C6 y C7.

influye en el flujo y en la retención de inclusiones. La relación geométrica largo/alto del inhibidor influye directamente en el patrón de circulación del fluido. Las configuraciones más alargadas favorecen trayectorias más directas y mayores velocidades medias, mientras que diseños más compactos inducen un flujo más lento y uniforme, lo que incrementa el tiempo disponible para la flotación de inclusiones. En la Figura 8 se observa que una relación largo a alto mayor corresponde a una mayor área recorrida por el trazador, lo que implica mayor velocidad media y menor eficiencia en la flotación, y lo contrario cuando la relación es menor.

La Figura 9 muestra la evolución de la tasa de crecimiento del área del trazador, evidenciando un régimen inicial altamente fluctuante durante los primeros 20 segundos, seguido por una disminución progresiva de la velocidad hasta aproximarse a un estado más estable. Entre los tres casos, C6 presenta las mayores oscilaciones iniciales, C3 muestra un comportamiento intermedio y C7 exhibe la variación más moderada, lo que sugiere diferencias en la disipación de energía inducida por la geometría del inhibidor.

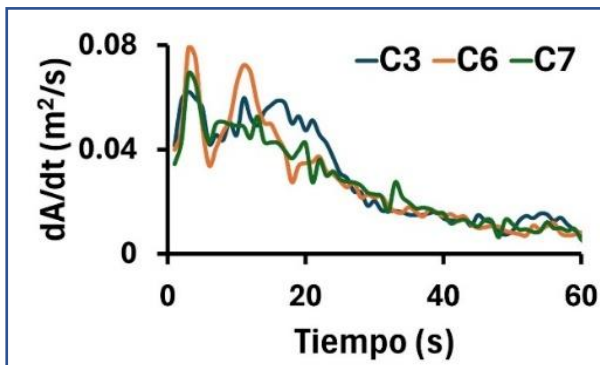


Figura 9. Rapidez del avance del trazador.

La aceleración del área, presentada en la Figura 10, confirma este comportamiento. C6 muestra las oscilaciones más pronunciadas entre empuje y frenado, reflejando una dinámica más inestable del flujo. C3 presenta variaciones moderadas, mientras que C7 mantiene picos definidos, pero con menor amplitud relativa, lo que indica un régimen más controlado.

En todos los casos se observa una tendencia neta hacia el frenado, asociada con la disipación progresiva de energía cinética dentro del distribuidor.



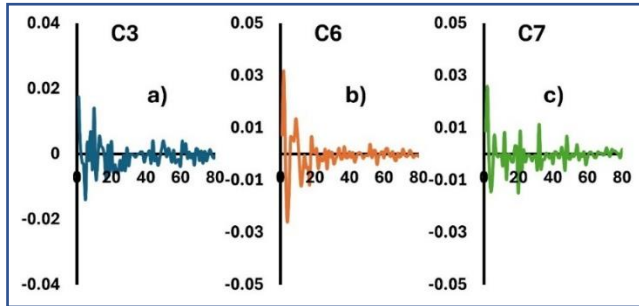


Figura 10. Aceleración de los casos a) C3, b) C6 y c) C7.

Las pérdidas de energía en el proceso se originan principalmente por la disipación viscosa y la turbulencia interna dentro del distribuidor. Los cambios de dirección y las variaciones de velocidad generan vórtices y microfluctuaciones que transforman parte de la energía cinética en calor y fricción contra las paredes, reduciendo progresivamente la energía disponible para mantener el movimiento y favoreciendo la estabilización del flujo. En los casos con inhibidores de turbulencia, esta disipación es más notoria, ya que los dispositivos inducen zonas de recirculación controlada que incrementan la pérdida de carga y limitan las velocidades extremas, promoviendo un régimen más uniforme.

El análisis del porcentaje de empuje y frenado permite observar que el distribuidor sin inhibidor presenta las aceleraciones más elevadas debido a un empuje inicial intenso seguido de un frenado pronunciado. En contraste, la incorporación de inhibidores reduce la magnitud de estas variaciones al disminuir la velocidad del flujo y moderar las fluctuaciones dinámicas. En un intervalo de 100 segundos, la suma de aceleraciones positivas representa el empuje total y la de las negativas el frenado total; la diferencia entre ambas define la resultante neta, que tiende hacia el frenado y confirma la disipación progresiva de energía. Como se muestra en la Figura 11, las configuraciones con menor disipación energética presentan un comportamiento hidráulico más estable, lo que se asocia con una mayor eficiencia en la flotación de inclusiones, tendencia que se sintetiza cuantitativamente en la Tabla 1.

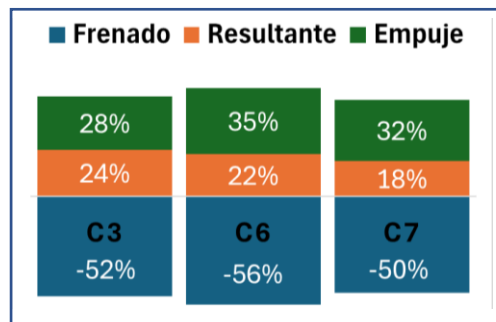


Figura 11. Porcentaje de empuje y frenado de la masa de fluido a 100 s.

Tabla 1. Resultados experimentales de los casos C3, C6 y C7.

Inhibidor	Polvo (g)	Área a 100 s (m ²)	Largo/Alto	% Frenado resultante	MRT (s)
C3	3.2	1.44	3.87	24	55
C6	2.76	1.38	2.62	22	56
C7	1.65	1.32	2.04	18	52

El análisis visual con trazador permitió observar detalles del movimiento del fluido durante el MRT que no pueden apreciarse con los métodos tradicionales de RTD. Se comprobó que un mismo valor de MRT puede asociarse con diferentes patrones de flujo, ya que cada inhibidor genera una distribución interna particular. En las etapas iniciales el avance del trazador fue semejante en los tres casos, aunque al final se presentaron diferencias en la dirección y estabilidad del flujo. El inhibidor C7 mostró el mejor desempeño en la flotación de inclusiones, seguido de C6, mientras que C3 presentó mayor arrastre de partículas hacia la parte inferior.

Las pruebas con polvo confirmaron que la forma y las dimensiones del inhibidor influyen directamente en la flotación y el arrastre de impurezas, factores determinantes para la limpieza del acero antes del vaciado.

El análisis de aceleración permitió distinguir los periodos de empuje y frenado del fluido, que reflejan la energía cinética interna y el efecto amortiguador de los inhibidores. La disminución de las aceleraciones evidencia una mayor disipación de energía por turbulencia y fricción, junto con una mejor estabilidad del flujo, como se aprecia en las Figuras 9, 10 y 11.

REFERENCIAS

Aguilar-Rodríguez, C.E., Ramos-Banderas, J.A., Torres-Alonso, E., Solorio-Díaz, G. & Hernández-Bocanegra, C.A. (2018). Flow characterization and inclusions removal in a slab tundish equipped with bottom argon gas feeding. *Metallurgist*, 61: 1055–1066. DOI: 10.1007/s11015-018-0607-0.



- Chang, L., Lu, L., Zhou, B. & Zhou, C. (2023). Dwell fatigue crack growth behavior of CP-Ti TA2 welded joint at 25 °C and 200 °C. *Metals*, 13: 553. DOI: 10.3390/met13030553.
- Chattopadhyay, K., Isac, M. & Guthrie, R.I.L. (2010). Physical and mathematical modelling of steelmaking tundish operations: A review of the last decade (1999–2009). *ISIJ International*, 50: 331–348. DOI: 10.2355/isijinternational.50.331.
- Ding, C., Lei, H., Zhang, H., Xu, M., Zhao, Y. & Li, Q. (2023). New insight into relationship between casting speed and inclusion removal in the tundish. *Journal of Materials Research and Technology*, 23: 5400-5412. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.02.146.
- Fang, Q., Zhang, H., Luo, R., Liu, C., Wang, Y. & Ni, H. (2020). Optimization of flow, heat transfer and inclusion removal behaviors in an odd multistrand bloom casting tundish. *Journal of Materials Research and Technology*, 9: 347-363. DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.10.064.
- Mazumdar, D. & Guthrie, R.I.L. (1999). Physical and mathematical modelling of continuous casting tundish systems. *ISIJ International*, 39: 524–547. DOI: 10.2355/isijinternational.39.524.
- Quan, Q., Zhang, Z.X., Qu, T.P., Li, X.L., Tian, J. & Wang, D.Y. (2023). Physical and numerical investigation on fluid flow and inclusion removal behavior in a single-strand tundish. *Journal of Iron and Steel Research International*, 30: 1182–1198. DOI: 10.1007/s42243-022-00884-3.
- Sahai, Y. (2016). Tundish technology for casting clean steel: A review. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 47: 2095–2126. DOI: 10.1007/s11663-016-0648-3.
- Sahai, Y. & Emi, T. (2007). *Tundish technology for clean steel production*. Singapore: World Scientific Publishing.
- Sheng, D.Y. & Yue, Q. (2020). Modeling of fluid flow and residence-time distribution in a five-strand tundish. *Metals*, 10: 1084. DOI: 10.3390/met10081084.
- Singh, P.K., Kumar, S. & Jain, P.K. (2023). Surface integrity of cryogenically finished additively manufactured and conventional Ti-6Al-4V alloy. *Metals*, 13: 693. DOI: 10.3390/met13040693.
- Tie, Z., Tang, H., Wang, K., Miao, H., Cai, S., Xian, F. & Zhang, J. (2022). Effect of flow field optimization of an asymmetric multi-strand tundish on the quality consistency of cracking con-rod steel. *Materials*, 15: 3698. DOI: 10.3390/ma15103698.
- Wang, Z., Yang, Z., Wang, X., Yue, Q., Xia, Z. & Xiao, H. (2022). Residence time distribution (RTD) applications in continuous casting tundish: A review and new perspectives. *Metals*, 12: 1366. DOI: 10.3390/met12081366.

Yi, B., Zhang, G., Jiang, Q., Zhang, P., Feng, Z. & Tian, N. (2023). The removal of inclusions with different diameters in tundish by channel induction heating: A numerical simulation study. *Materials*, 16: 5254. DOI: 10.3390/ma16155254.

CRECER EN LA FRONTERA: LAS DINÁMICAS DE CRIANZA EN EL NORTE DE LA PROVINCIA DE COAHUILA DURANTE LA SEGUNDA MITAD DEL SIGLO XVIII

EL CASO DE MARÍA GERTRUDIS SÁNCHEZ NAVARRO

*GROWING UP ON THE FRONTIER: CHILD-REARING DYNAMICS
IN NORTHERN COAHUILA PROVINCE DURING THE SECOND
HALF OF THE 18TH CENTURY
THE CASE OF MARÍA GERTRUDIS SÁNCHEZ NAVARRO*

FREYSSINIER Y DÁVILA, Anarika

VALDÉS DÁVILA, Carlos Manuel

RESUMEN

El presente artículo analiza las prácticas de crianza en el norte de la Nueva España, específicamente en la Provincia de Coahuila a finales del siglo XVIII. Desde una perspectiva que articula espacio, frontera e infancia, se expone el caso de María Gertrudis Sánchez Navarro pues su vida refleja las complejas relaciones entre poblaciones indígenas, específicamente apaches e hispano-criollas en un contexto fronterizo caracterizado por la colonización, la subyugación, la resistencia y el intercambio cultural. Se propone que el espacio no constituye un simple escenario pasivo sino un elemento activo que moldea las prácticas sociales y las experiencias infantiles, particularmente en territorios de frontera. La investigación se inscribe metodológicamente en la microhistoria italiana y en el paradigma indiciario propuesto por Carlo Ginzburg y Natalie Zemon Davis, recurriendo a fuentes documentales heterogéneas —como registros parroquiales, informes y crónicas religiosas— que permiten reconstruir, de manera conjetural, aspectos de las dinámicas de crianza y de las infancias en el periodo colonial. Se reconoce explícitamente la ambigüedad, parcialidad y carga ideológica de las fuentes, producidas dentro de las estructuras de poder del orden novohispano, lo que obliga a una lectura crítica y contextualizada. La frontera es abordada como una categoría dinámica, difusa y polisémica, más allá de su dimensión geográfica o política, entendida como un espacio de contacto, negociación y reconfiguración cultural. En este marco, las infancias son una construcción sociocultural diversa y plural, profundamente atravesada por la condición

Facultad de Ciencias Sociales,
Universidad Autónoma de Coahuila.
Saltillo, Coahuila, México.

Correspondencia
anarika_freyssinier@uadec.edu.mx
<https://orcid.org/0009-0009-5914-5304>
Fecha de recepción
20 de febrero de 2026.
Fecha de aceptación
13 de mayo de 2026.

fronteriza. El análisis demuestra que las prácticas de crianza estuvieron marcadas por relaciones asimétricas de poder, así como por procesos de transculturación, en los cuales tanto los grupos indígenas como los hispano-criollos se transformaron mutuamente. La crianza emerge, así, como un ámbito privilegiado para comprender las tensiones, adaptaciones y nuevas realidades sociales que se configuraron en la frontera norte de la Nueva España.

Palabras clave: frontera; infancia; crianza; Coahuila; microhistoria.

ABSTRACT

This article analyzes child-rearing practices in northern New Spain, specifically in the Province of Coahuila, at the end of the 18th century. From a perspective that articulates space, the frontier, and childhood, it presents the case of María Gertrudis Sánchez Navarro, whose life reflects the complex relationships between Indigenous populations, specifically the Apaches, and Hispanic-Creoles in a frontier context marked by colonization, subjugation, resistance, and cultural exchange. It proposes that space is not merely a passive setting, but an active element that shapes social practices and childhood experiences, particularly in frontier territories. Methodologically, the research is situated within microhistory and the evidentiary paradigm proposed by Carlo Ginzburg and Natalie Zemon Davis, drawing on heterogeneous documentary sources—such as parish registers, reports, and religious chronicles—that allow for the conjectural reconstruction of aspects of child-rearing dynamics and childhood experiences during the colonial period. The ambiguity, bias, and ideological bias of the sources, produced within the power structures of the colonial order, are explicitly acknowledged, reinforcing a critical and contextualized reading. The frontier is approached as a dynamic, diffuse, and polysemous category, transcending its geographical or political dimension, and understood as a space of contact, negotiation, and cultural reconfiguration. Within this framework, childhoods are a diverse and plural sociocultural construct, profoundly shaped by the frontier condition. The analysis demonstrates that child-rearing practices were marked by asymmetrical power relations, as well as by processes of transculturation, in which both Indigenous and Hispanic-Creole groups mutually transformed one another. Child-rearing thus emerges as a privileged sphere for understanding the tensions, adaptations, and new social realities that took shape on the northern frontier of New Spain.

Keywords: *frontier; childhood; child-rearing; Coahuila; microhistory.*

INTRODUCCIÓN

El espacio es elemento fundamental en la conformación de una sociedad y, a su vez, lo son los grupos sociales que fueron moldeando ese espacio que habitaron, apropiándose y configurándolo a través del tiempo, dándole un sello específico. Las prácticas sociales ligadas al espacio físico habitado y las experiencias infantiles, como la crianza, se ven atravesadas por esta dinámica. Este artículo reconstruye históricamente parte de la realidad del norte de la Nueva España, específicamente de la Provincia de Coahuila, esto, a través de la experiencia de crianza de María Gertrudis, quien fue en sí misma extraordinaria, pues su caso permite analizar las convulsas relaciones entre indios e hispano-criollos: la subyugación que convertía a los indígenas en servidumbre, el intercambio cultural que emanó de esa relación y el proceso de colonización de la frontera a través de estrategias religiosas y militares.

El estudio de las infancias y de las dinámicas socioemocionales y culturales, como la crianza, está estrechamente ligado a la microhistoria y a la búsqueda de indicios. Siguiendo lo propuesto por Carlo Ginzburg:

El desafío en el método es descubrir las vías que le permitan acceder a la reconstrucción de las culturas que dejan pocos rastros o evidencias de su pasado. La propuesta indiciaria busca renovar los métodos tradicionales de investigación, dándoles la voz a los que no la tienen, renovar paradigmas y conceptos, el modo de concebir el estatuto de prueba y las formas de control y verificación de los resultados historiográficos (Jiménez, 2011).

Esta investigación utiliza documentación muy variada donde menciones y datos, en ocasiones por demás breves, arrojan información importante acerca de las prácticas de crianza, las consecuencias que estas tenían en las infancias y en los adultos mismos y las dinámicas donde se hace palpable la agencia de niños y niñas. Detrás de frases, en apariencia simples menciones, se revela información trascendental. Los indicios encontrados arrojan información coherente, solo a través del contexto en que están insertos: "El contexto ayuda a pensar lo que los documentos nos dicen, pero lo que de ahí se infiere, son

posibilidades, no consecuencias necesarias; es decir, la mayoría de las veces, conjeturas y no hechos verificables” (Jiménez, 2011, p. 24). En esta investigación el análisis de las realidades pretéritas está permeado por conclusiones conjeturales. Es imposible conocer el pensamiento y sentimientos de los agentes del pasado, pero tenemos todo un espectro de posibilidades históricas. Como señala Ginzburg (2014), refiriéndose a los aportes de Natalie Zemon Davis: “Davis no está apuntalada sobre la contraposición entre 'verdadero' e 'inventado' sino más bien sobre la integración, siempre señalada puntualmente, entre 'realidad' y 'posibilidades' (esto en plural)”. Es decir, no será atípico que la documentación que suele llegar a ser ambigua, en algunos casos, escasa o simplemente sorprendente, nos permita jugar con los “quizás” y los “puede ser” (Davis, 1984). Tales indicios, huellas e incluso el caso de estudio, permiten entrever, conjeturar y tratar de reconstruir, en parte, la realidad de las infancias en el pasado. Infancia y frontera: la crianza atravesada por la transculturación y las dinámicas de poder.

Para el presente estudio la frontera es un ente vivo en constante mutación y avance, no es solamente un límite geográfico o político. En su acepción más simple y llana, la frontera es un frente, es la parte delantera de una totalidad, ¿de qué totalidad?, ¿hasta dónde llega? ¿cuál es el límite del que pretende ser ella misma el límite? Su significado aparentemente simple, encierra en sí mismo contradicciones y complejidad. La categoría de frontera es difusa, complicada y escurridiza. La frontera puede ser entendida desde la geopolítica como un límite entre naciones, sin embargo, para la presente investigación utilizaremos la categoría desde una concepción mucho más filosófica, entendiendo la frontera como aquello que marca la separación entre el “adentro” y el “afuera”, entre el “uno” y el “otro,” separación que resulta ser tensa y al final borrosa (Barei, 2013).

La frontera no es —como a menudo se piensa— zona de exclusiones donde se filtra o limita la penetración de lo externo, ni es tampoco una especie de “tierra de nadie”, sino un umbral en donde se negocian procesos de integración, lugar “bilingüe” que promueve adaptaciones, reelaboraciones y translaciones que reterritorializan un colectivo sumamente complejo (Barei, 2013). La frontera que se conformó en el norte de la Nueva España fue múltiple y variada según sea su cualidad: religiosa, económica, cultural, lingüística, política o geográfica, e incluso dichos caracteres pueden estar sobrepuestos.



Por otro lado, la infancia no solo constituye una etapa en el desarrollo humano, sino que también es una construcción sociocultural que varía de un contexto a otro y que, incluso de manera simultánea, ha presentado a lo largo del tiempo una diversidad que hoy en día nos obliga a estudiarla y nombrarla en plural. Aunque no se ahondará en modelos, ni se pretende generalizar las infancias de esta región, indudablemente compartieron un contexto que permeó experiencias muy concretas, muy propias, que les imprimieron características particulares; ese contexto está marcado con certeza por ser frontera.

Una característica compleja de las prácticas de crianza en la región fue la constante interacción, el intercambio y la mezcla entre dos grupos: los hispano-criollos y los indígenas. Tales interacciones estuvieron marcadas por dinámicas de poder y subyugación, en las que los hispano-criollos ejercieron una hegemonía evidente y abrumadora. Los grupos nómadas, por su parte, también expresaron su lucha y resistencia mediante diversas prácticas que obligaron a los criollos a buscar o aceptar un intercambio o una relación dialógica entre sociedades que se pensaban prácticamente enemigas. El estudio muestra la historia de niños indios esclavizados, obligados a trabajar como servidumbre doméstica, coaccionados a sedentarizarse y a ser presionados a una evangelización cuyos dogmas y creencias estaban muy alejados de sus propios credos, mitos y rituales. Existió también la experiencia de niños raptados por indígenas que llegaron a convertirse en guerreros de una banda india y contribuyeron a las prácticas de resistencia de las propias sociedades étnicas.

Todos los grupos involucrados en la conformación del espacio fronterizo aportaron y recibieron, en diferente medida y a través del mestizaje y encuentros violentos o intercambios pacíficos, una influencia que no solo resultó impuesta sino también recíproca. Para efectos de la investigación, la categoría de transculturación resulta apropiada para comprender los intercambios culturales. Más allá de la simple asimilación, postulamos que todos los grupos que habitaron la frontera se vieron transformados tras el contacto, tal como lo señaló el antropólogo cubano Fernando Ortiz, quien enuncia cabalmente, que todo inmigrante:

[...] experimenta cambios en su cultura originaria; pero también provoca un cambio en la matriz de la cultura receptiva. [...] Todo cambio de cultura [...] toda transculturación, es un proceso en el cual siempre se da algo a cambio de lo que se recibe [...] es un proceso en el cual ambas partes de la ecuación resultan

modificadas. Un proceso en el cual emerge una nueva realidad compuesta y compleja; una realidad que no es una aglomeración mecánica de caracteres, ni siquiera un mosaico, sino un fenómeno nuevo, original e independiente (Iznaga, 1982).

En el caso estudiado fue más común que excepcional, que los niños y niñas fuesen criados por personas fuera de su núcleo familiar. No estamos hablando de una familia extendida o espiritual, sino de sujetos totalmente ajenos a su grupo social. Este fenómeno usualmente estaba relacionado con dinámicas de poder, donde las infancias quedaban subyugadas a un grupo contrario: los niños indios criados en misiones para efectos de sedentarización y evangelización, o bien el caso de niños hispanos cautivos de los indios y rescatados. Por otro lado, dinámicas domésticas de servidumbre y esclavitud con niños indios rescatados por soldados o nanas y nodrizas que criaron niños y niñas hispanos. Estos fenómenos quedan a la vista en el caso de María Gertrudis Sánchez Navarro. Las fuentes provienen principalmente de registros parroquiales e informes de evangelización hechos por religiosos, que hablan desde la memoria de sus protagonistas o de testigos, e incluso en crónicas escritas por religiosos que fueron testigos de los acontecimientos enunciados. Se advierte que los textos, escritos tanto por los evangelizadores como por agentes de la burocracia hispana, deberemos siempre “leerlos” teniendo en cuenta el momento en que fueron escritos y el objetivo de su redacción. No consideramos (y lo decimos con claridad) que todo texto antiguo revele verdades; por el contrario, muestra concepciones y significados expresados dentro del contexto (Ricoeur, 1986), en este caso el poder novohispano en todas sus áreas.

1. UNA NANA APACHE, LA INFANCIA DE MARÍA GERTRUDIS ATRAVESADA POR LA FRONTERA

María Gertrudis Sánchez Navarro trasciende como un claro ejemplo de las dinámicas fronterizas de crianza. Como hispano-criolla, pertenecía al grupo dominante de la región. Al ser una habitante de la frontera, su infancia (y su juventud) estuvieron marcadas por el contacto con los indígenas, en este caso, los apaches. La mayor parte de su vida transcurrió en la frontera norte de la Provincia de Coahuila. Aun siendo ella una niña, su relación con los apaches



fue de poder, donde los indios eran subordinados a su familia, una de las más poderosas del noreste novohispano (Harris, 1989). Sin embargo, como veremos a través de algunos fragmentos de su vida, además de su propio testimonio, la relación de poder traspasó la dicotomía simple amo-sirviente.

En la frontera noreste habitaron muchos individuos bilingües, cosa que consideramos un hecho que persiste en varias fronteras del mundo. En este caso, y no en pocos ejemplos, los hispano-criollos podían comunicarse en una o más lenguas indígenas, y no es raro encontrar en las fuentes que los propios sujetos atribuyen esto a las circunstancias de su crianza. La propia María Gertrudis lo hace así en un testimonio. Otro ejemplo es Juan Agustín de Espinosa, de quien se menciona: “sabía hablar la lengua de los zacatecos porque se crio en el Real de Minas de Zacatecas” (Pérez de Ribas, 1645). Otro es el caso de Ambrosio de Cepeda en el siglo xvii, que jugaba con los niños de las familias indígenas que su padre había contratado y cuyos aduares estaban alrededor del río Grande para ayudarlo en la cosecha. Se afirmaba que “habla las más de las lenguas de los indios del norte”, y fue ocupado por gobernadores del Nuevo Reino de León y de Coahuila, así como por obispos, y sirvió como traductor simultáneo (Valdés, 2017).

María Gertrudis nació en la villa de Santiago del Saltillo en 1739. Era hija de Francisco Sánchez Navarro y de Luisa de Herrera (Familysearch, 2025). Como muchas familias de hispano-criollos en el noreste, la de María Gertrudis había logrado diversificar sus actividades económicas y poseía extensas propiedades en diversas zonas de la región (Harris, 1989). La mayor parte de su vida transcurrió en el norte de Coahuila; llegó a la villa de San Fernando de Austria a los 16 años. En el padrón de 1777 refirió ser originaria de San Juan Bautista del Río Grande, por lo que inferimos que pasó ahí su niñez o al menos parte de ella.

No pocas de sus experiencias fueron relatadas por ella misma; otras por testigos, en un documento fechado en 1783. El documento recababa el testimonio de varios pobladores de San Fernando de Austria (actual Zaragoza, Coahuila) en un intento de beatificar a fray Antonio de Aguilar, misionero y párroco de esa villa, quien atendía a algunas otras aldeañas en lo que hoy se conoce como “Cinco Manantiales” (Biblioteca Pública del Estado de Jalisco [BPEJ], 1783). Este fraile llegó a la región aproximadamente en 1756. Según los testimonios y algunos documentos misionales de la época, fray Antonio se caracterizó por una ardua labor evangelizadora, aplicada con cierta obsesión, entre los grupos indios de la región, en particular los apaches. A este



franciscano se le atribuyeron poderes milagrosos como la clarividencia, el don profético, el control de fenómenos naturales y de enfermedades, así como una constante lucha contra el demonio mediante exorcismos. De hecho, su relación con María Gertrudis está ligada a un fenómeno de posesión.

Es un hecho que fray Antonio de Aguilar arribó a la villa cuando su creación era todavía muy reciente y aún la inestabilidad y la precariedad eran una constante en la vida cotidiana de sus habitantes. Esta particularidad nos permite comprender parte de las hazañas milagrosas que se le atribuyen, así como la importancia de su labor evangelizadora en este contexto fronterizo y diversificado en cuanto a sus habitantes. El contacto con el mundo indio seguía siendo una amenaza, a pesar de los intercambios y acercamientos que llegaron a tener. Fray Antonio mismo relató en sus informes el estado de la villa, sus habitantes y su parroquia:

Advierto también que el Padre Fray Juan Rubio cuando ahora seis años vine le halle aquí viviendo en jacalito y entiendo pasando bastantes trabajos en la administración de esta frontera, villa, como lo indicaba la escasas y bastos mantenimientos con que el pobre me parece se mantenía [...] (Biblioteca Centro Cultural Viro Alessio Robles [BCCVAR], s.f).

En el mismo informe refirió el acercamiento paulatino de los apaches para ser bautizados y evangelizados, siendo él mismo un importante eslabón para lograr este cometido. Valiéndose de intérpretes e indios aliados, visitaba las ranherías y fue granjeándose la confianza y el cariño de los gentiles, como solían llamar a los que todavía no eran cristianos. Entre las particularidades de la villa de San Fernando y sus alrededores está precisamente la interacción con los grupos indios, siendo la región donde más abundaron los registros de apaches bautizados.

María Gertrudis llegó a la villa de San Fernando debido a una supuesta posesión diabólica. Fray Antonio de Aguilar no era ajeno a la familia, pues anteriormente había solicitado al padre de María Gertrudis que la dejase ser madrina de un parvulito apache, pero su padre, Francisco, se negó. Sin embargo, con el tiempo, las circunstancias lo obligaron a enviar a su hija a la frontera. La joven vivió con fray Antonio y se anotó que “la tuvo el Venerable Padre siempre consigo haciéndola dormir en la iglesia, y comer de lo mismo que el Venerable Padre comía” (BPEJ, 1783), pues de esta forma podía “controlar” su posesión. Durante muchos años, el término poseso se utilizó indistintamente para referirse no solo a los casos de posesión diabólica, sino

también a algunas enfermedades mentales que en su momento se desconocían (Foucault, 1967 y Alejo, 2011). Probablemente lo que María Gertrudis padecía era una condición ligada a epilepsia, esto rebasaba su predisposición por las creencias y la fe de su contexto (Reséndiz, 2019). Algunas declaraciones hechas por los vecinos de la villa dan luz sobre el supuesto “que la traía tan inquieta, y por los golpes que le hacía dar contra las paredes y contra el suelo: que no la podían sujetar sino amarrada con la estola” (BPEJ, 1783). Al atarla con estola el fraile estaba recurriendo a un objeto sagrado. En efecto, la estola la usa obligadamente un sacerdote para confesar. Aunque esté en ropa normal, la estola es obligatoria. Hay ahí un aspecto simbólico interesante: el diablo no podrá poseerla si lleva una estola. Se mencionó también que, en ocasión de que el demonio que tenía en el cuerpo la había tirado al suelo en medio de la calle y no la podía hacer levantarse, aun con ayuda de algunos hombres que se hallaban presentes, y que pesaba tanto que no había fuerzas humanas para levantarle de donde estaba (BPEJ, 1783).

El hecho de ser una posesa y tener que vivir junto al padre Aguilar dieron a María Gertrudis la oportunidad de colaborar en la evangelización de los apaches. Ella fue un elemento de suma importancia en esta misión, pues sabía hablar su lengua y actuó como intérprete y apoyo incondicional de fray Antonio. En los testimonios para la beatificación del fraile, se le menciona como traductora y compañera del fraile, siendo esta joven un importante canal de comunicación entre el mundo hispano y el mundo indio. María Gertrudis podía hablar la lengua de los indios de la región debido a su cercanía con esos grupos a través de diversas formas de subordinación y explotación que los hispano-criollos ejercían sobre los indígenas.

Su relevancia puede comprenderse en una dimensión estructural de la sociedad, pues “la historia de la conciencia común y de la conciencia individual manifiesta el movimiento incesante de explicitación por el cual las estructuras practicadas y vividas sin ser temáticamente planteadas pasan a ser normas y valores reconocidos”, como menciona explícitamente Bourdieu (1968). Esta habilidad lingüística se adquiere en la infancia según el caso, pues ella menciona “que por haberla criado una india apache, que le sirvió al Venerable Padre Aguilar de intérprete pues sabía muy bien la lengua y en todo lo que se le ofrecía al Venerable Padre con los indios para todo estaba pronta” (BPEJ, 1783). La pericia con la que parece haber manejado el lenguaje, el hecho de haberlo aprendido en la infancia gracias al contacto con su nana y la forma en que se relacionaba pacífica y amistosamente con

los apaches, denotan que María Gertrudis no solo hablaba la lengua de los indios, sino que tenía una conexión cultural proveniente de su propia crianza. En una carta, fray Antonio de Aguilar refiere que en una ocasión bautizó a una parvulita apache cuya familia se oponía al principio, y fue precisamente María Gertrudis quien intervino a favor de la evangelización de la niña:

Habiendo la persona interprete que hoy es aquí una doncella virtuosa y beatica nuestra visitando a los indios que con sus tráficos se hallaban aquí la mañana del 25 de enero de 1760 luego les trato del Santo Bautismo, dio una parvulita de poco más de año en que se había de bautizar. Se le opusieron fuertemente la madre, y mucho más la abuela, procurándola disuadir ya con caricias y ya con amenazas de rigor: pero con la ayuda de Dios se mantuvo la angelita tan firme en su deseo, que aun a los otros indios presentes servía como de reflexión y gracejo. En fin, como de los párvulos es el Reyno de los Cielos, venció la fuerte parvulita y cansada la madre al ponerse el sol, hubo de rendirse la madre después de un bofetón. Y sin más acompañamiento se hubo de venir la chicuela en brazos de su madrina que fue la dicha Beatita de la Iglesia, en donde la bautice luego y luego vino ya la madre y quedo muy contenta gracias a Dios. (BCCVAR, s.f)

En este caso, tanto María como el fraile y los apaches son representantes de la reproducción de la sociedad dominante desde sus propios espacios. Este suceso es referido en tres fuentes distintas: la carta de fray Antonio de Aguilar, el testimonio de María Gertrudis en el proceso de beatificación del fraile, donde dijo que dicho padre ya la esperaba para bautizar a la pequeña, aun sin saber que ella había acudido a la ranchería (BPEJ, 1783) y la fe de bautismo en San Fernando de Austria donde se encuentra el registro de Paula, justo como se indicó en la carta de fray Antonio, un 25 de enero de 1760. Sus padres fueron Quin Dác Lá y Xiá Xindi. Como sus padrinos aparecen Joseph Santiago Navarro y María Candelaria Navarro (Familysearch, 2025/2), aunque el nombre parece no coincidir con el de María Gertrudis, al cotejar los tres documentos lo más probable es que se trate de la misma, lo que es evidente es que los mencionados padrinos pertenecían a la clase terrateniente.

El bautismo de Paula es relevante por los datos sobre las infancias y el contexto de San Fernando, así como por la propia vida de María Gertrudis. En primer lugar, denota que los niños eran un importante medio de convencimiento para evangelizar y bautizar a los indios, esta hipótesis será explorada más adelante. Según se refiere en los dos documentos, la propia niña era quien deseaba bautizarse, aunque parece poco probable por ser tan pequeña, esta aseveración de los testigos parece indicar que, aun cuando los adultos podían

manipular la voz de los niños, esa voz existía y podía legitimar las acciones de los adultos. Nos permite entrever que, a pesar de los matices propios de su condición subalterna, los niños tenían agencia en la sociedad. Por otro lado, muestra la constante interacción que había entre apaches e hispano-criollos de la región, donde existía una firme o continua tensión y, al mismo tiempo, un proceso de asimilación, y donde las infancias no estaban ajenas a estas dinámicas; al contrario, eran parte activa de ellas. En este caso, es evidente que madre y abuela estaban encargadas de la crianza de Paula; su bautismo muestra los procesos de decisión respecto a bajo qué normas sociales, ideas, dinámicas y prácticas se va a criar a la niña.

En segundo lugar, María Gertrudis actúa como agente mediador entre ambas culturas. Es ella quien acude a la rancharía de los apaches, esto demuestra que era bien recibida por ellos y que, aun siendo muy joven, tenía autonomía y agencia en su contexto. Finalmente es ella quien traslada a la niña a San Fernando y participa como su madrina.

El padrinazgo implicaba un lazo espiritual de gran trascendencia en este periodo. Era tan categórico que el padrino de bautismo no podía casarse con su ahijada, so pena de ser enjuiciado como incestuoso, es decir, que no era un parentesco nada más en un sentido religioso, sino también como una especie de genealogía ritual. Aunque en ninguno de los documentos aparece explícitamente esta aseveración, María Gertrudis parece haber influido en que los familiares la convirtieran en bautismo.

El capitán Vicente Rodríguez, personaje influyente en la región, al referirse a las hazañas de fray Antonio de Aguilar, relató que un día los apaches llegaron a la villa “con ánimo de acabar con todos los individuos” (BPEJ, 1783); el fraile ordenó que todos los vecinos y sus familias se encerrasen en la iglesia para refugiarse.

Cuando los indios llegaron y vieron que no había nadie, se dirigieron a la iglesia y la cercaron. Ante el inminente ataque, fray Antonio llamó a María Gertrudis y le pidió “les hablase en su lengua entreteniéndolos, ni entrar, él iba a hacer oración delante del altar de Dios Nuestro Señor” (BPEJ, 1783). Al parecer el fraile solía tardarse rezando, o quizá solo buscaba ganar tiempo mientras María Gertrudis convencía a los indios de no atacar: “Y no solo como se los mandaba y como él se da que se tarda en rezar un Ave María, volvió el Venerable Padre y les dijo a todos los moradores, hermanos no teman daño alguno por que es Dios servido el que los indios hayan mudado de intención



como ahora lo verán” (BPEJ, 1783). Finalmente, el fraile salió a hablar con los indios por medio de María Gertrudis:

Y luego por medio de la interpreta les hablo diciendo él que se fueran porque Dios se los mandaba. Y luego al punto se fueron y les aseguró el Venerable Padre a todos los vecinos, y moradores de esta villa, el que no harían daño en ella ni entrarían nunca de guerra. Pero que en los alrededores podían alguno que encontraran, si lo veían retirado, el matarlo. Como así sucedido desde entonces, no dándose caso en que hayan entrado hacer daño sino de paz a comerciar cambalacheando con cibolas y gamuzas, carne, manteca y otras cosas (BPEJ, 1783).

Por la naturaleza del documento, se resaltan las cualidades proféticas del fraile al tranquilizar a la población diciendo que los indios no los atacarían. Pero, en los hechos, fue María Gertrudis quien tuvo la misión de recibir a los apaches que habían llegado en son de guerra. A María Gertrudis se le dejó a la deriva frente a estos hombres, quizá confiando en que solo ella podría convencerlos de no atacar a los habitantes de la pequeña villa. Era la única que representaba el elemento fluctuante entre ambas culturas, la que podría establecer un diálogo pacífico, conciliar y llegar a un acuerdo, que, por sí misma, representaba la otredad, pero que podía ser considerada como parte de una y otra sociedad y ser apreciada y comprendida por ambas.

San Fernando de Austria tiene un pasado tan excepcional, tan diferente a los sucesos que en otras pequeñas comunidades tuvieron lugar, ya que le tocó ser frontera, villa, misión, ser, sin duda (porque el rey de España lo obligaba), pueblo de indios. Tuvo una historia anómala dentro de una amplia región, que se sostenía indómita en medio de otras dos gobernaturas, la del Nuevo Reino de León y la de la Nueva Vizcaya.

Su pertenencia a la Provincia de Coahuila y la lejanía de los poderes políticos y religiosos le permitieron ser diferente. Y en ella brillaron María Gertrudis Sánchez, el padre Aguilar, algunos hombres ricos y una banda de apaches. Su peculiaridad radica en que supo o pudo establecer los lazos que unían a todos y cada uno de los sujetos o agentes de esa población. Pero, sin la menor duda, María Gertrudis fue la persona que creó un acontecimiento histórico que aquí se estampó.



2. LENGUAJE COMO DINÁMICA DE CRIANZA Y RESISTENCIA

La raíz de estos episodios en los que María Gertrudis media entre el mundo indio y el hispano, está precisamente en su infancia. En la forma en que fue cuidada y criada por una apache. La adquisición del lenguaje es parte del proceso neurológico y social de los seres humanos; se da evidentemente en las primeras etapas de la vida y, por supuesto, hace parte de las prácticas de crianza, donde el cuidador primario enseña y encamina al niño o niña en las dinámicas de socialización de su comunidad. El cerebro de las personas que son bilingües desde la infancia, además, tiene sus propias particularidades:

La adquisición del idioma es más fácil en los primeros años de vida, que si en los primeros años de vida el niño está expuesto a dos o más idiomas los aprende como lenguas maternas, no lenguas secundarias, y que para la adquisición de dos o más idiomas al mismo tiempo, el niño necesita referencias diferentes. (Bepe y Zomignan, 2020)

Aprender un idioma requiere naturalmente de un proceso donde frecuentemente se escuche esa lengua, y no solo que se escuche, sino que se entablen diálogos. Incluso los bebés que aún no hablan mantienen comunicación, especialmente con su cuidador primario, y estos diálogos primitivos, envueltos en mimos y un lenguaje adaptado para el pequeño, constituyen una importante fase en el aprendizaje del idioma para el niño. A esta adaptación del lenguaje se le denomina habla materna (por ser usualmente la madre el cuidador primario de los bebés), diversos estudios destacan su influencia en el desarrollo del aprendizaje del lenguaje en los infantes (Rivero, 1993). El desarrollo del lenguaje es uno de los hitos cognitivos más importantes de los seres humanos. La forma en que se adquiere o se aprende ha sido tema de diversas teorías; algunas destacan primordialmente la relación social con la neurobiología, siendo el aspecto emocional y afectivo un elemento importantísimo para que el infante pueda desarrollar correctamente el lenguaje y, en este caso particular, el aprendizaje de dos idiomas. Vygotsky es el principal referente de esta teoría que relaciona el aprendizaje del lenguaje con el contexto social (Bepe y Zomignan, 2020).

María Gertrudis había sido criada (con todas las implicaciones socioemocionales que ello conlleva) por una india, pero en un contexto occidental. La india era una sirvienta en el hogar de los Sánchez Navarro. Esto explica que María Gertrudis tuviese en su bagaje cultural aspectos hispanos y



también indios, incluido el hecho de hablar ambas lenguas. La nana era una subalterna para la familia y, aun en el marco de esta relación de dominación, había transmitido elementos culturales propios de su grupo a la niña que cuidaba.

La otra cara de la moneda, la propia vida de la india, no es negada en las fuentes, pues ni siquiera conocemos su nombre. Tan solo sabemos que era una apache. Sin embargo, siguiendo las ideas de Davis, analizando el contexto y la documentación a la que ya hemos hecho referencia en los apartados anteriores, es más que probable que esa nana haya llegado a la familia Sánchez Navarro de manera forzada. Extraída de su vida gentil, trasladada en alguna collera, rescatada en alguna refriega. Puesta de pie en alguna casa hispana loable, donde se le evangelizaría, aunque, en la práctica, también se le explotaría. Quizá incluso ella misma era una niña cuando cuidaba de otros niños.

Aun siendo una subalterna esa apache resistió, pero desde una dimensión socioafectiva y quizá incluso inconsciente, compartiendo su cultura con María Gertrudis. Tomando en consideración las funciones que desempeñaba una nana en el periodo colonial, lo más probable es que la apache cargara y acunara a esa niña hispano-criolla. Quizá no solo acunó a la niña en sus brazos, pues seguramente también fungió como su nodriza y le dio de mamar, mientras le cantaba nanas en su lengua india; y le enseñó, mientras pasaban las tardes, los juegos que a ella le enseñaron su madre y su abuela; y para contentarla en sus momentos de aburrimiento quizá le contó historias de su pueblo. Criar, sea la época que sea, implica una relación emocional, un contacto tan íntimo que es inevitable mezclar el amor y el cariño en el cuidado por la supervivencia; mezclar los bagajes culturales que cargamos y el mundo nuevo que se presenta para esa criatura a quien se cuida.

En otros contextos, hay estudios sobre las nodrizas griegas como vínculos de transmisión de elementos culturales entre las élites romanas (Pedrucci, 2020). El haber aprendido la lengua de esa india es el ejemplo más claro de la fuerza y la profundidad que existieron en ese vínculo de crianza entre una apache y una niña española.

Por otra parte, Fray Antonio Aguilar abandonó la villa de San Fernando para viajar a Guadalajara. Posteriormente viajó a España y obtuvo un puesto administrativo en su orden. Nunca llegó a ser canonizado, aunque su labor evangelizadora en la villa quedó patente. Al abandonar San Fernando dejó a

María Gertrudis una reliquia con la cual cesó su posesión. Probablemente esta reliquia ejerció un poder psicosomático significativo sobre la joven. María Gertrudis continuó viviendo en la villa de San Fernando hasta su muerte en 1827. Se casó con Antonio de Córdoba, un sastre hispano-criollo. Fue madre de cuatro hijos; Josef María, Josef German, Josef y María Josefa. Aunque no eran pobres, tampoco formaban parte de la élite. En 1777 vivían en un jacal, poseían un solar plantado (aunque sin escrituras), una yegua y un caballo manso. En 1797 quedó viuda y no se tiene registro de que haya contraído nuevas nupcias. En años posteriores, dos de sus hijos se casaron con vecinos de la villa.

Queda en el aire la increíble posibilidad de que María Gertrudis haya transmitido esos elementos híbridos de su propia crianza a sus hijos. Haciendo lo que todos los padres y madres han hecho por siglos; transmitir a sus hijos, por medio de la experiencia de su propia crianza, los elementos sociales, comunitarios y culturales de su contexto, enseñando desde la infancia las normas y habilidades que les permitan sobrevivir. María Gertrudis sobrevivió a la hostilidad de la frontera, no solo como hija, sino también como madre.

CONCLUSIONES

La frontera noreste de la Nueva España es un espacio donde inevitablemente confluyeron diversos grupos humanos. Esta dinámica fue especialmente intensa en la interacción entre los grupos indios y los hispano-criollos. Aunque se ha aclarado desde el inicio que no pretendemos crear un modelo genérico de infancia fronteriza, es importante señalar que el espacio y las relaciones que se dieron entre los diversos grupos que lo habitaban, por supuesto, permearon la vida de los niños y niñas que formaban parte de ellos. No hablamos de un modelo, sino de hilos que conectan y dan continuidad entre las diversas infancias que habitaron esta frontera.

Se ha hecho evidente que las poblaciones del norte de Coahuila eran un conglomerado de poblados de diversa índole, pero interconectados en sus prácticas y en la vida cotidiana. Presidios, misiones, villas, ranchos, haciendas y pueblos de indios compartían realidades y, en el devenir diario, sus habitantes fluían entre los diversos espacios. San Fernando de Austria es una



población muy particular por su relación con los apaches y su carácter fronterizo, sin embargo, no existía de forma aislada. Su conexión social, política, cultural y económica con otros poblados era evidente. Las dinámicas de esta región eran distintas a las de otros lugares como Saltillo o Monterrey, si bien había una relación con estas poblaciones, es evidente que el espacio en San Fernando y sus alrededores estaba forjado según las circunstancias fronterizas de sus propios habitantes.

Las relaciones entre los sujetos que habitan un mismo espacio están permeadas por dicho espacio. En este artículo hemos podido analizar las relaciones de crianza entre adultos y niños, la agencia de los pequeños en sus comunidades y las desventajas sociales que los ponían en situaciones de vulnerabilidad, en un espacio fronterizo donde el choque y los encuentros entre grupos de diverso origen daban lugar a intercambios y tensiones. Se ha analizado un caso específico, que, si bien nos permite entender las propias dinámicas de la frontera, no deja de tener una excepcionalidad que lo hace único. No estamos frente a una estadística más, ni a un modelo genérico, los casos particulares demuestran la propia diversidad de la humanidad.

A través de la vida de María Gertrudis Sánchez Navarro podemos entender no solo las pautas de crianza de una niña hispana que creció en interacción con los apaches, cuya nana de origen indio le enseñó a hablar su propia lengua. Este hecho de su infancia le dio a María Gertrudis herramientas que, en medio de una frontera convulsa y violenta, le permitieron sobrevivir y coadyuvar a los intereses de su propio grupo social. Los acontecimientos documentados de su vida también reflejan la realidad de las infancias indias. Al poner en contexto la mención de María Gertrudis con las fuentes que nos hablan de refriegas entre hispanos e indios, en las que las niñas y mujeres indias eran tomadas como presas para ser puestas en servidumbre en casas de familias hispanas, podemos conjeturar acerca del origen de aquella nana.

La esclavitud era un negocio, un sistema económico que hacía de la frontera un espacio atractivo, pero que, a la vez, generaba tensiones sociales, políticas y militares que afectaban la vida de todos sus habitantes. La esclavitud, explotación y subyugación de los grupos indios por parte de los hispano-criollos daban pie a una serie de acontecimientos y dinámicas que afectaban de forma mucho más intensa a las infancias indias, aunque también atravesaban las propias infancias hispano-criollas. Dentro de su especificidad, el caso de María Gertrudis nos permite comprender las dinámicas de guerra

en la frontera y la increíble capacidad de supervivencia y de reconfiguración de las realidades de los niños.

Crecer en la frontera noreste implicaba para los niños y niñas interactuar con el otro todo el tiempo, aunque con distintos grados de intensidad. En esa interacción podían estar inmersos en procesos de transculturación relativamente pacíficos, como la evangelización en las misiones, o en dinámicas violentas como el rapto, la explotación mediante la servidumbre o la esclavitud. Infancias hispanas e infancias indias estaban expuestas a estos acontecimientos, y no de manera aislada, al contrario. Interactuaban entre sí (además de con los adultos) mediante esas dinámicas. Demostrando así su increíble capacidad de adaptación, aprendizaje y reconfiguración de sus propias realidades. El caso de María Gertrudis demuestra que las infancias eran agentes reconfiguradores y no solo supervivientes, en medio de los conflictos, los intercambios, la asimilación y la tensión. Teniendo en cuenta todos los factores que intervinieron en esta historia, a la que María Gertrudis otorga una unidad, creemos que lo que hemos aportado es un texto original sobre un tema profundo, interesante y necesario, que es el de las infancias. Esto es lo que otorga un nuevo sentido a la documentación estudiada.

REFERENCIAS

- Alejo, A. (2011). El poder y sus resistencias: Las figuras de la brujería, la posesión y la histeria. *Psicología XVIII III Congreso Internacional de Investigación y Práctica Profesional*: 19–23. Disponible en: <https://www.aacademica.org/000-052/124>
- Barei, S. (2013). Fronteras naturales/fronteras culturales: Nuevos problemas/nuevas teorías. *Tópicos del Seminario*, 29: 109–125. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=5942787300>
- Bepe Gabriotti, R. y Zomingnan, R. (2020). El cerebro bilingüe: El cerebro procesa durante la adquisición del lenguaje. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, 5(16): 68–96. DOI: <https://doi.org/10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/educacion-es/el-cerebro-bilingue>
- Biblioteca Centro Cultural Vito Alessio Robles [BCCVAR] (s.f). *Carta del reverendo padre Fray Antonio de Aguilar. Misionero en la misión de San Fernando de Austria*. Fondo Manuscritos. Saltillo, Coahuila, México. 1 p.

- Biblioteca Pública del Estado de Jalisco "Juan José Arreola" [BPEJ] (1783). *Información levantada en el año de 1783, sobre las heroicas virtudes y milagros de Fray Antonio de Aguilar*. Archivo franciscano. Guadalajara, Jalisco. 6 f.
- Bourdieu, P. (1968). *El sentimiento del honor en la sociedad de Cabília* EN J. G. Peristiany (Ed.), *El concepto del honor en la sociedad mediterránea* (pp. 165–224). Labor.
- Bourdieu, P. (1972). *Esquisse d'une théorie de la pratique*. Droz.
- Calderón Rivera, E. (2017). El papel de la dimensión afectiva en la adquisición del lenguaje materno. *Alteridades*, 27(53): 11–22. Disponible en: <https://alteridades.izt.uam.mx/index.php/Alte/article/view/864>
- Davis, N. (1984). *El regreso de Martin Guerre*. Antoni Bosch.
- Foucault, M. (1967). *Historia de la locura en la época clásica*. Fondo de Cultura Económica.
- Familysearch (2025). Registros Parroquiales 1627-1978. "Registro de Bautismo de María Gertrudis Sánchez Navarro". En *Sagrario Metropolitano de Saltillo, Coahuila. Libro de Bautismos 1738–1743*. México, Coahuila, p.38. Consultado en marzo de 2025. <https://www.familysearch.org/ark:/61903/3:1:S3HT-6S59-YW2?view=index&personArk=%2Fark%3A%2F61903%2F1%3A1%3A6DV9-P7CY&action=view&cc=1502401&lang=es&groupId=M93F-KK2>
- Familysearch (2025/2). Registros Parroquiales 1627-1978. "Registro de Bautismo de Paula". En *Coahuila. Libro de Bautismos San Fernando de Rosas*. México, Coahuila, p.31. Consultado en marzo de 2025. <https://www.familysearch.org/ark:/61903/3:1:S3HT-6S59-YW2?view=index&personArk=%2Fark%3A%2F61903%2F1%3A1%3A6DV9-P7CY&action=view&cc=1502401&lang=es&groupId=M93F-KK2>
- Ginzburg, C. (2014). *Tentativas. El queso y los gusanos: Un modelo de historia crítica para el análisis de las culturas subalternas*. Ediciones Desde Abajo.
- Harris, C. (1989). *El imperio de la familia Sánchez Navarro, 1765–1867*. Sociedad Monclovense de Historia.
- Iznaga Beira, D. (1982). *El estudio del arte negro en Fernando Ortiz*. Instituto de Literatura y Lingüística/Academia de Ciencias de Cuba.
- Jiménez Becerra, A. (2011). Carlo Ginzburg: Reflexiones sobre el método indiciario. *Esfera*, (1): 21–28. Disponible en: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/esfera/article/view/5789/7258>
- Pedrucci, G. (2020). Mothers for sale: The case of the wet nurse in the ancient Greek and Roman world. An overview. *Arenal*, 27(1): 134–137. Disponible en: <https://revistaseug.ugr.es/index.php/arenal/article/view/6354/13296>

Pérez de Ribas, A. (1645). *Historia de los triunphos de nuestra Santa Fee entre gentes las más barbaras y fieras y del nuevo orbe*. Alonso de Paredes.

Reséndiz Aparicio, J., Pérez, J., Olivas-Peña, E., García-Cuevas, E., Roque-Villavicencio, Y., Hernández-Hernández, M., Castro-Macías, J. I., & Rayo-Mares, J. D. (2019). Guía clínica: Definición y clasificación de la epilepsia. *Revista Mexicana de Neurociencia*, 20(2): 7–12. DOI: <https://doi.org/10.24875/rmn.m19000052>

Ricoeur, P. (1986). *Du texte à l'action. Essais d'herméneutique, II*. Seuil.

Rivero, M. (1993). La influencia del habla de estilo materno en la adquisición del lenguaje: valor y límites de la hipótesis del input. *Anuario de Psicología*, (57): 45–64. Disponible en: <https://raco.cat/index.php/AnuarioPsicologia/article/view/61191/88756>

Valdés, C. (2017). *La gente del mezquite: Los nómadas del noreste en la Colonia* (2ª ed.). Secretaría de Cultura de Coahuila.

ORBIFOLD NO ABELIANO S_3 Y SU GRUPO DE SABOR

NON-ABELIAN ORBIFOLD S_3 AND ITS FLAVOR GROUP

RESUMEN

PÉREZ MARTÍNEZ, Ricardo

El problema del sabor trata de dar una explicación al patrón observado para las masas de los fermiones del Modelo Estándar. Una propuesta para el entendimiento de este problema es considerar grupos discretos no Abelianos como extensiones al Modelo Estándar. Tales grupos de sabor pueden originarse en los orbifolds usados en las compactificaciones de la cuerda heterótica. La relación entre la geometría del orbifold y los grupos de sabor es establecida por la regla de selección del grupo de espacio, la cual ha sido usualmente aplicada a orbifolds Abelianos. Sin embargo, el origen de grupos de sabor a partir de orbifolds no Abelianos no ha sido tan explorado. En este trabajo consideramos el orbifold no abeliano S_3 y determinamos su grupo de sabor al usar el formalismo de la regla de selección basado en la Abelianización del grupo de espacio. La estructura del grupo de sabor que encontramos es $[(Z_2 \times Z_3)]^3 = Z_6^3$.

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

Palabras clave: orbifold; teoría de cuerdas; grupo de sabor; regla de selección; abelianización.

ABSTRACT

The flavor problem seeks to explain the observed pattern for the masses of fermions in the Standard Model. One approach to understanding this problem is to consider non-Abelian discrete groups as extensions to the Standard Model. Such flavor groups can originate from the orbifolds used in the compactifications of the heterotic string. The relationship between orbifold geometry and flavor groups is established by the space group selection rule, which has usually been applied to Abelian orbifolds. However, the origin of flavor groups from non-Abelian orbifolds has received scant attention. In this work, we consider the non-Abelian orbifold S_3 and determine its flavor group

Correspondencia
ricardo.perezmartinez@uadec.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0003-2923-4970>
Fecha de recepción
14 de enero de 2026.
Fecha de aceptación
11 de mayo de 2026.

using the selection rule formalism based on the Abelianization of the space group. We find the flavor group structure $((Z_2 \times Z_3)^3 = Z_6^3$.

Key words: orbifold; string theory; flavor group; selection rule; abelianization.

1. INTRODUCCIÓN

El Modelo Estándar (ME) describe las partículas elementales y sus interacciones. Es un modelo definido en cuatro dimensiones (4D) y sus predicciones han sido comprobadas experimentalmente con éxito (Langacker, 2010). Sin embargo, el ME no explica algunas cuestiones fundamentales, por ejemplo, el origen y el patrón de las masas de los fermiones (Grossman, 2010). Para tratar de dar una explicación a este problema, conocido como el problema del sabor, se han propuesto grupos discretos no abelianos llamados grupos de sabor, donde la palabra sabor se refiere a los distintos tipos de fermiones en el ME (Ishimori y col., 2010).

Los grupos aplicados al problema del sabor pueden ser elegidos de los grupos conocidos en matemáticas tomando en cuenta su viabilidad fenomenológica en los modelos donde estos grupos son considerados. En tales casos, el origen de los grupos de sabor no proviene del modelo, sin embargo, tales grupos pueden tener un origen en la compactificación de la cuerda heterótica en orbifolds en 6D para obtener modelos que pudieran contener al ME y su versión con supersimetría (Escalante-Notario y col., 2025; Nilles y col., 2012; Ramos-Sánchez, 2009). Para definir a un orbifold en 6D se requiere el espacio real y el grupo de espacio, el cual es generado por traslaciones en una retícula y el grupo de punto, que a la vez es un subgrupo discreto del grupo ortogonal en 6D. El grupo de punto puede ser Abeliano o no Abeliano, dando lugar al nombre de orbifold Abeliano y no Abeliano. La clasificación de los grupos de espacio para orbifolds que son usados consistentemente en las compactificaciones de la cuerda heterótica es presentada en (Fischer y col., 2013).

El origen de los grupos de sabor a partir de la geometría del orbifold está establecido por la regla de selección del grupo de espacio (Kobayashi y col., 2007; Nilles y Ramos-Sánchez, 2024). En las compactificaciones de la cuerda heterótica en orbifolds Abelianos se han obtenido e inspeccionado distintos grupos de sabor (Carballo-Pérez y col., 2016; Olgún-Trejo y col., 2018;



Ramos-Sánchez, 2017). Algunos orbifolds no Abelianos han sido explorados para efectuar compactificaciones de la cuerda heterótica (Fischer y col., 2013; Hernández-Segura y Ramos-Sánchez, 2025; Konopka, 2013). En la referencia (Ramos-Sánchez y Vaudrevange, 2019) se presenta el formalismo de la regla de selección basado en la Abelianización del grupo de espacio para determinar los grupos de sabor de orbifolds Abelianos, como los reportados en (Fischer y col., 2013).

Dado que el origen de grupos de sabor por la regla de selección en orbifolds no Abelianos no ha sido tan explorado, en este trabajo nos interesa aplicar el formalismo reportado en (Ramos-Sánchez y Vaudrevange, 2019) para determinar el grupo de sabor de un orbifold no Abeliano. Específicamente, el problema que abordamos en este artículo es obtener el grupo de sabor que se origina del orbifold no Abeliano S_3 al usar la regla de selección del grupo de espacio y su Abelianización. Debido a la naturaleza no Abeliana del orbifold S_3 mencionamos algunos aspectos a considerar al aplicar este formalismo, así como algunas observaciones.

La organización de este artículo se presenta enseguida. En la sección 2 presentamos el orbifold no Abeliano S_3 , y algunas propiedades esenciales del grupo S_3 . El formalismo de la regla de selección del grupo de espacio y su Abelianización se muestra en la sección 3. El grupo de sabor que obtenemos al aplicar este formalismo al orbifold no Abeliano S_3 se presenta en la sección 4, junto con algunos comentarios. Finalmente, presentamos las conclusiones en la sección 5.

2. ORBIFOLD S_3

El orbifold S_3 en seis dimensiones (6D) está definido por el cociente

$$O = \frac{\mathbb{R}^6}{S},$$

donde $\mathbb{R}^6$ es el espacio real en 6D y S es el grupo de espacio generado por el grupo de punto $P = S_3$ y traslaciones en una retícula Λ en 6D definida por

$$\Lambda = \{n_i e_i \mid n_i \in \mathbb{Z}\},$$

donde $e_i, i=1,2,\dots,6$, son sus vectores base. La notación $n_i e_i$ indica sumatoria sobre el índice i de 1 a 6. El grupo de permutaciones de tres objetos S_3 está definido por la presentación

$$S_3 = \langle \omega, \theta \mid \omega^2 = \theta^3 = (\omega\theta)^2 = \mathbb{1} \rangle,$$

donde ω y θ son sus generadores, y $\mathbb{1}$ denota al elemento identidad en S_3 . Los elementos del grupo de espacio S se denotan por

$$g = (\omega^k \theta^l, n_i e_i),$$

donde $k=0,1$ y $l=0,1,2$ para el orbifold S_3 . La multiplicación de dos elementos $g = (\varphi, \lambda), g' = (\varphi', \lambda')$ de S está dada por

$$gg' = (\varphi, \lambda)(\varphi', \lambda') = (\varphi\varphi', \varphi\lambda' + \lambda),$$

donde $\varphi = \omega^k \theta^l$ y $\lambda = n_i e_i$. El elemento inverso de $g = (\varphi, \lambda)$ es $g^{-1} = (\varphi^{-1}, -\varphi^{-1}\lambda)$ tal que $gg^{-1} = (\mathbb{1}, 0)$, el elemento identidad del grupo de espacio S .

Los generadores del grupo de espacio S son denotados por

$$g_\omega = (\omega, 0), \quad g_\theta = (\theta, 0), \quad T_i = (\mathbb{1}, e_i),$$

donde g_ω y g_θ generan el grupo de punto, y T_i generan las traslaciones. Los elementos de S se pueden escribir en términos de sus generadores como

$$g = (\omega^k \theta^l, n_i e_i) = T_1^{n_1} \dots T_6^{n_6} g_\omega^k g_\theta^l.$$

La definición del orbifold indica que los elementos g de S actúan sobre las coordenadas x de $\mathbb{R}^6$ como $x' = gx = (\varphi, \lambda)x = \varphi x + \lambda$. Cuando $x' = x$ y el determinante de $(\mathbb{1} - \varphi)$ es no nulo se tienen puntos fijos en el orbifold. Los elementos g de S asociados a los puntos fijos son llamados los elementos constructores. La clase de conjugación de un elemento g de S está definida por

$$[g] = \{hgh^{-1} \mid \forall h \in S\}$$

Cualquier elemento en la clase de conjugación del elemento constructor g denota al mismo punto fijo inequivalente en el orbifold. Esto es importante porque en las compactificaciones de la cuerda heterótica en orbifolds se



obtienen cuerdas torcidas, nuevas cuerdas cerradas que resultan de la acción no trivial de S sobre $\mathbb{R}^6$, con la propiedad de estar adjuntadas a los puntos fijos del orbifold (Ramos-Sánchez, 2017). Entonces, todos los elementos en la clase de conjugación del elemento constructor g denotan a la misma cuerda torcida en el orbifold.

2.1 ALGUNOS ASPECTOS BÁSICOS DEL GRUPO S_3

En esta subsección presentamos algunas propiedades de S_3 que son relevantes en el cálculo del grupo de sabor para el orbifold no Abelianiano S_3 .

Las clases de conjugación de S_3 son $C_1 = \{1\}$, $C_2 = \{\theta, \theta^2\}$ y $C_3 = \{\omega, \omega\theta, \theta\omega\}$. El orden de los elementos en C_2 y C_3 es tres y dos, respectivamente. El subgrupo conmutador de un grupo G es el subgrupo generado por todos los conmutadores $[g, h] = ghg^{-1}h^{-1}$ de G . El subgrupo conmutador de S_3 es isomorfo al grupo cíclico $\mathbb{Z}_3 = \{1, \theta, \theta^2\}$, el cual es normal en S_3 . La Abelianización de un grupo G está dada por el grupo cociente de G con su subgrupo conmutador. Por lo tanto, la Abelianización de S_3 está dada por

$$\frac{S_3}{\mathbb{Z}_3} = \mathbb{Z}_2,$$

dando lugar al homomorfismo de S_3 a $\mathbb{Z}_2$, donde $H = \{1, \theta, \theta^2\} = \mathbb{Z}_3 = C_1 \cup C_2$, y $M = \{\omega, \omega\theta, \theta\omega\} = C_3$ se comportan como los dos elementos del grupo Abelianiano $\mathbb{Z}_2$. En particular, H toma el papel de la identidad en $\mathbb{Z}_2$, y M corresponde al generador de orden dos de tal grupo.

En la Figura 1 se muestra un esquema que ilustra la Abelianización de S_3 .

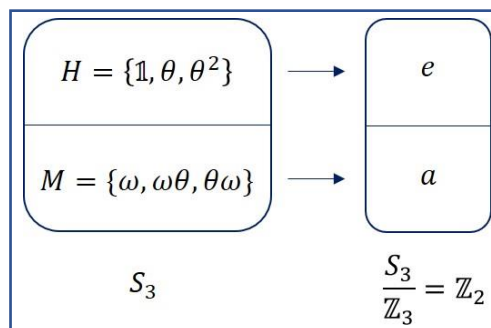


Figura 1. Abelianización de S_3 . Los conjuntos H y M de S_3 son mapeados al elemento identidad, e , y al elemento de orden dos, a , del grupo $\mathbb{Z}_2$ respectivamente. El conjunto H es el grupo $\mathbb{Z}_3$, el cual es el subgrupo conmutador de S_3 .

3. REGLA DE SELECCIÓN DEL GRUPO DE ESPACIO Y SU ABELIANIZACIÓN

La regla de selección del grupo de espacio S establece que la interacción de m cuerdas torcidas es permitida si el producto de sus m elementos constructores es trivial en S , es decir, si se cumple que

$$\prod_{a=1}^m h_a g_a h_a^{-1} = (1, 0),$$

donde g_a , con $a=1,2,\dots,m$, denotan los elementos constructores, y hemos usado la propiedad de que los elementos en la clase de conjugación de g_a denotan a la misma cuerda torcida. Esta regla de selección permite obtener el grupo de sabor a partir de la geometría del orbifold, y establece también una conservación de cargas discretas k, l, n_i que garantizan que la regla de selección se cumpla (Kobayashi y col., 2007; Olguín-Trejo y col., 2018).

Una manera alternativa e interesante de la regla de selección del grupo de espacio se presenta en (Ramos-Sánchez y Vaudrevange, 2019), donde los autores determinan el grupo de sabor de orbifolds Abelianos presentados en (Fischer y col., 2013) al considerar la Abelianización del grupo de espacio. Enseguida presentamos los aspectos básicos de este formalismo, para mayores detalles ver la referencia (Ramos-Sánchez y Vaudrevange, 2019).

Sea s un mapeo del grupo de espacio S al grupo de sabor denotado por D_S , y con las siguientes propiedades:

- i) s es una función de la clase de conjugación de S , y entonces se verifica que

$$s(hgh^{-1}) = s(g),$$

para todo h, g de S .

- ii) s es una representación de S , y entonces se cumple que

$$s(g_1 g_2) = s(g_1) s(g_2),$$

donde g_1, g_2 son elementos de S .

En este formalismo la regla de selección del grupo de espacio está dada por



$$\prod_{a=1}^m s(g_a) = s(1, 0) = 1$$

donde 1 denota al elemento identidad del grupo de sabor D_S . Además, se verifica que $s(hg) = s(gh)$ por lo que el conmutador $[g, h] = ghg^{-1}h^{-1}$ cumple que

$$s([g, h]) = 1.$$

Por lo tanto, la representación s de S es equivalente a la Abelianización de S (Ramos-Sánchez y Vaudrevange, 2019). Para obtener el grupo de sabor D_S del orbifold necesitamos primero obtener la presentación del grupo de espacio S , la cual está formada por las siguientes relaciones:

$$g_\omega^M, g_\theta^N, [g_\omega, g_\theta], [T_i, T_j], [g_\omega, T_i], [g_\theta, T_i],$$

donde M y N denotan el orden de g_ω y g_θ . Después, se determina la presentación del grupo de sabor D_S usando el mapeo s de S a D_S junto con la Abelianización del grupo de espacio, $s([g, h]) = 1$. En la siguiente sección aplicamos este formalismo al orbifold no Abeliano S_3 .

4. GRUPO DE SABOR DEL ORBIFOLD NO ABELIANO

Consideramos el orbifold S_3 reportado en (Konopka, 2013). Los generadores del grupo de espacio son $g_\omega = (\omega, 0)$, $g_\theta = (\theta, 0)$, $T_i = (1, e_i)$, donde $e_i, i = 1, 2, \dots, 6$, son los vectores base de la red Λ . Los generadores del grupo de punto $P = S_3$ son g_ω y g_θ . Los elementos ω y θ están dados, en la base de la red, por las matrices

$$\omega = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad \theta = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

las cuales cumplen que $\omega^2 = \theta^3 = (\omega\theta)^2 = \mathbb{1}$, la matriz identidad de dimensión seis. Las evaluaciones de las expresiones que necesitamos para obtener la presentación del grupo de espacio se presentan en la **Tabla 1**.

En la primera columna se muestran las expresiones que necesitamos para obtener la presentación del grupo de espacio. En la segunda columna se muestran sus resultados de acuerdo a la geometría del grupo de espacio del orbifold S_3 . La notación $T_1^{-1}T_2^{-2}$ indica $T_1^{-1}T_2^{-2} = (\mathbb{1}, -e_1 - 2e_2)$, etc.

Tabla 1. Generadores y sus conmutadores para la presentación del grupo de espacio.

Expresiones para los generadores de S	Relaciones para la presentación de S
g_ω^M, g_θ^N	$g_\omega^2 = g_\theta^3 = (\mathbb{1}, 0)$
$[g_\omega, g_\theta]$	$[g_\omega, g_\theta] = (\theta, 0) = g_\theta$, y entonces $[g_\omega, g_\theta]^3 = (\mathbb{1}, 0)$
$[T_i, T_j]$	$[T_i, T_j] = (\mathbb{1}, 0)$
$[g_\omega, T_i]$	$[g_\omega, T_1] = (\mathbb{1}, 0)$, $[g_\omega, T_2] = T_1^{-1}T_2^{-2}$, $[g_\omega, T_3] = (\mathbb{1}, 0)$, $[g_\omega, T_4] = T_3^{-1}T_4^{-2}$, $[g_\omega, T_5] = T_5^{-2}$, $[g_\omega, T_6] = T_6^{-2}$
$[g_\theta, T_i]$	$[g_\theta, T_1] = T_1^{-1}T_2$, $[g_\theta, T_2] = T_1^{-1}T_2^{-2}$, $[g_\theta, T_3] = T_3^{-2}T_4^{-1}$, $[g_\theta, T_4] = T_3T_4^{-1}$, $[g_\theta, T_5] = (\mathbb{1}, 0)$, $[g_\theta, T_6] = (\mathbb{1}, 0)$

De esta forma, la presentación del grupo de espacio S está dada por

$$S = \langle g_\omega, g_\theta, T_i \mid g_\omega^2, g_\theta^3, [g_\omega, g_\theta]^3, [T_i, T_j], [g_\omega, T_1], [g_\omega, T_2] T_1 T_2^2, \dots, [g_\theta, T_6] \rangle,$$

donde los tres puntos (...) indican las otras relaciones asociadas a $[g_\omega, T_i]$ y $[g_\theta, T_i]$. Cada término a la derecha de la línea vertical en la presentación de S es igual a $(\mathbb{1}, 0)$, el elemento identidad del grupo de espacio.

Aplicando la función s de S a D_S obtenemos la presentación del grupo de sabor,

$$D_S = \langle s(g_\omega), s(g_\theta), s(T_i) \mid s(g_\omega)^2, s(g_\theta)^3, s(T_1 T_2^2), s(T_3 T_4^2), s(T_5^2), s(T_6^2), \\ s(T_1 T_2^{-1}), s(T_1 T_2^2), s(T_3 T_4), s(T_3^{-1} T_4) \rangle,$$

donde hemos usado la Abelianización del grupo de espacio, y entonces, expresiones como $s([g_\omega, T_2])s(T_1 T_2^2) = 1$ llegan a ser $s(T_1 T_2^2) = 1$. Además,



hemos removido los términos asociados a los conmutadores triviales, por ejemplo, $s([T_i, T_j])$.

Para obtener el grupo de sabor del orbifold no Abelian S_3 analizamos las relaciones que definen la presentación de D_S , estas son:

$$a) s(g_\omega)^2 = 1, s(g_\theta)^3 = 1$$

$$b) s(T_1)s(T_2)^2 = 1, s(T_1)s(T_2)^{-1} = 1$$

$$c) s(T_3)s(T_4)^2 = 1, s(T_3)^2s(T_4) = 1, s(T_3)^{-1}s(T_4) = 1$$

$$d) s(T_5)^2 = 1, s(T_6)^2 = 1$$

De a) se obtiene el grupo $\mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_3$. Las relaciones en b) indican que $s(T_1) = s(T_2)$, por lo que $s(T_1)^3 = 1$, lo cual define el grupo $\mathbb{Z}_3$. Análogamente, de c) se obtiene otro grupo $\mathbb{Z}_3$ ya que $s(T_3) = s(T_4)$, y entonces $s(T_3)^3 = 1$. Finalmente, las expresiones en d) definen al grupo $\mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_2$.

Por lo tanto, el grupo de sabor D_S que se origina de este orbifold no Abelian S_3 al aplicar la regla de selección del grupo de espacio y su Abelianización está dado por

$$D_S = \mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_3 \times \mathbb{Z}_3 \times \mathbb{Z}_3 \times \mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_2.$$

Las cargas discretas asociadas a este grupo de sabor son $k, l, n_1 + n_2, n_3 + n_4, n_5$ y n_6 , respectivamente. Las condiciones que deben cumplir tales cargas para que la interacción de cuerdas torcidas sea permitida, es decir, que la regla de selección del grupo de espacio se verifique, son $k = 0 \bmod 2$, $l = 0 \bmod 3$, $n_1 + n_2 = 0 \bmod 3$, $n_3 + n_4 = 0 \bmod 3$, $n_5 = 0 \bmod 2$ y $n_6 = 0 \bmod 2$.

Lo anterior puede entenderse al considerar el elemento constructor $s(g) = s(T_1)^{n_1}s(T_2)^{n_2} \dots s(T_6)^{n_6}s(g_\omega)^k s(g_\theta)^l$ y la presentación de D_S . Por ejemplo, sabemos que $s(T_1) = s(T_2)$ y que $s(T_1)^3 = 1$. Entonces, la parte $s(T_1)^{n_1}s(T_2)^{n_2}$ de $s(g)$ llega ser $s(T_1)^{n_1+n_2}$ con la condición $n_1 + n_2 = 0 \bmod 3$ asociada al grupo $\mathbb{Z}_3$. De una manera análoga se obtienen las condiciones para las demás cargas discretas.



5. DISCUSIÓN

El conmutador $[g_\omega, g_\theta]$, donde $g_\omega = (\omega, 0)$ y $g_\theta = (\theta, 0)$, merece una atención en el cálculo del grupo de sabor D_S para el orbifold no Abelian S_3 , ya que a diferencia de los orbifolds Abelianos donde tal conmutador es el elemento identidad, aquí tenemos que $[g_\omega, g_\theta]$ es un elemento no trivial del subgrupo conmutador de S_3 , y por lo tanto tal conmutador es de orden tres. En base a esto tenemos las siguientes tres observaciones:

Primera, sabemos que el conmutador $[g_\omega, g_\theta] = (\theta, 0)$. Entonces, al aplicar la función s de S a D_S , tenemos que $s([g_\omega, g_\theta]) = s(\theta, 0) = s(\theta^2, 0)$, ya que s es una función de la clase de conjugación de S . Como $g_\theta = (\theta, 0)$ y $g_\theta^2 = (\theta^2, 0)$ son de orden tres, se tiene que

$$s([g_\omega, g_\theta])^3 = s(g_\theta)^3 = s(g_\theta)^6 = 1,$$

lo cual podría conducir a elegir $s(g_\theta)^6 = 1$ como la expresión para obtener la parte del grupo de sabor asociado a esta relación, es decir, el grupo $\mathbb{Z}_6$. Lo anterior es erróneo en este caso ya que el grupo $\mathbb{Z}_3$ está definido como $\mathbb{Z}_3 = \{1, \theta, \theta^2 \mid \theta^{\{0 \bmod 3\}} = 1\}$, y entonces se cumple que $\theta^0 = \theta^3 = \theta^6 = \theta^9 = \dots = \theta^{\{0 \bmod 3\}} = 1$. Es decir, en $\mathbb{Z}_3$ tener al generador θ con $\theta^3 = 1$ para su definición, es lo mismo que tomarlo con $\theta^6 = 1$, o $\theta^9 = 1$, etc. Entonces, en la relación de igualdades mostrada anteriormente para $s([g_\omega, g_\theta])^3$ debemos tomar el menor entero positivo no nulo del conjunto de exponentes $\{3, 6\}$ para $s(g_\theta)$. De esta manera obtenemos el grupo correcto para esta relación, $\mathbb{Z}_3$ a partir de $s(g_\theta)^3 = 1$.

Segunda, el conmutador $s([g_\omega, g_\theta])^3 = s(g_\theta)^3 = 1$ nos sugiere dos visiones alternativas. Una, que reproduce la relación del generador de orden tres, g_θ , que ya teníamos desde un inicio. Dos, que simplemente veamos el resultado final $s([g_\omega, g_\theta])^3 = 1$, y entonces, una relación trivial que no conduce a una relación nueva o independiente. Por lo tanto, la estructura del grupo de sabor definido por la presentación de D_S no es modificada por el conmutador $s([g_\omega, g_\theta])^3$.

Tercera, el elemento $g_\omega = (\omega, 0)$ no surge en el conmutador $[g, h]$, donde g y h son de la forma $(\alpha, 0)$ con $\alpha \in S_3$. Esto es porque el subgrupo conmutador de S_3 es $\mathbb{Z}_3 = \{1, \theta, \theta^2\}$, lo cual establece que $[g, h] = (1, 0)$ o $(\theta, 0)$ o $(\theta^2, 0)$.



Excluyendo el caso trivial, resulta que los casos donde $[g, h] = (\theta, 0)$ o $(\theta^2, 0)$ corresponden a las maneras equivalentes de elegir a los dos generadores del grupo S_3 . Por ejemplo, $[g, h] = (\theta, 0)$ para $g = g_\omega = (\omega, 0)$ y $h = g_\theta = (\theta, 0)$, $[g, h] = (\theta^2, 0)$ para $g = g_\theta$ y $h = g_\omega$, o también para $g = g_\omega$ y $h = g_{\omega\theta} = (\omega\theta, 0)$, etc. Esto es también entendido al recordar la definición del grupo S_3 mediante su presentación mostrada en la sección 2.

Por otra parte, el grupo de sabor $D_S = \mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_3 \times \mathbb{Z}_3 \times \mathbb{Z}_3 \times \mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_2$ puede ser escrito en forma más compacta como $\mathbb{Z}_6^3$, ya que $\mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_3 = \mathbb{Z}_6$. Sin embargo, para indicar sus cargas discretas es conveniente escribir la estructura de D_S en una forma no completamente factorizada, como lo escribimos originalmente.

De esta forma es posible notar una correspondencia directa entre las cargas discretas $k, l, n_1 + n_2, n_3 + n_4, n_5, n_6$ con el grupo cíclico factor asociado. Por ejemplo, la asociación n_5 con $\mathbb{Z}_2$ indica que $n_5 = 0 \bmod 2$, lo cual es una manera sencilla de expresar la condición más general $\sum_{a=1}^m n_5^{(a)} = 0 \bmod 2$, y de manera análoga para las otras cargas de acuerdo al orden del grupo cíclico correspondiente. Tales condiciones sobre las cargas implican que la interacción de m cuerdas torcidas sea permitida bajo el grupo de sabor D_S , es decir, que el término de interacción de las m cuerdas torcidas sea invariante bajo este grupo. Equivalentemente, tales condiciones sobre las cargas garantizan que la regla de selección del grupo de espacio se verifique, y entonces que el producto $s(g_1)s(g_2) \dots s(g_m) = 1$, donde $g_a = (\omega^{k^{(a)}} \theta^{l^{(a)}}, n_i^{(a)} e_i)$, con $a = 1, 2, \dots, m$, denotan los elementos constructores de las m cuerdas torcidas en interacción.

CONCLUSIONES

Motivados por explorar el origen de grupos de sabor en orbifolds no Abelianos, nos propusimos determinar el grupo de sabor para el orbifold S_3 reportado en (Konopka, 2013) al usar el formalismo de la regla de selección del grupo de espacio y su Abelianización presentado en (Ramos-Sánchez y Vaudrevange, 2019). Encontramos que el grupo de sabor para este orbifold no Abeliano S_3 es

$$D_S = \mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_3 \times \mathbb{Z}_3 \times \mathbb{Z}_3 \times \mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_2,$$



donde el primer grupo $\mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_3$ proviene de la parte del grupo de punto $P = S_3$ del grupo de espacio mediante las relaciones $s(g_\omega)^2 = 1$ y $s(g_\theta)^3 = 1$, mientras que los demás grupos factores surgen de la parte traslacional del grupo de espacio, en particular de los conmutadores $s([g_\omega, T_i])$ y $s([g_\theta, T_i])$. Las cargas discretas para D_S son $k, l, n_1 + n_2, n_3 + n_4, n_5$ y n_6 , respectivamente. Tales cargas cumplen las condiciones $k = 0 \bmod 2$, $l = 0 \bmod 3$, $n_1 + n_2 = 0 \bmod 3$, $n_3 + n_4 = 0 \bmod 3$, $n_5 = 0 \bmod 2$ y $n_6 = 0 \bmod 2$, las cuales garantizan que la regla de selección del grupo de espacio se cumpla. Notamos también que el conmutador $s([g_\omega, g_\theta])^3$ no influye en las demás relaciones que determinan el grupo de sabor D_S para este orbifold no Abelian S_3 .

PLANES FUTUROS

Para otros orbifolds no Abelianos como los reportados en (Fischer y col., 2013) que incluyen roto-traslaciones (elementos del grupo de punto más traslaciones que no están en la retícula) habría que inspeccionar la influencia de $s([g_\omega, g_\theta])^m$, donde m es el orden del conmutador $[g_\omega, g_\theta]$, en las relaciones que determinan al grupo de sabor D_S , ya que podría pasar que $s([g_\omega, g_\theta])^m$ fuera no trivial, resultando en una posible modificación a la estructura esperada de D_S . Este análisis formará parte de un trabajo futuro.

REFERENCIAS

- Carballo-Pérez, B., Peinado, E., & Ramos-Sánchez, S. (2016). $\Delta(54)$ flavor phenomenology and strings. *Journal of High Energy Physics*, 2016(12): 131. [https://doi.org/10.1007/jhep12\(2016\)131](https://doi.org/10.1007/jhep12(2016)131)
- Escalante-Notario, E., Pérez-Martínez, R., Ramos-Sánchez, S., & Vaudrevange, P. K. (2025). The non-SUSY orbifold: A tool to build promising non-supersymmetric string models. *Computer Physics Communications*, 317: 109829. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2025.109829>
- Grossman, Y. (2010). Introduction to flavor physics. CERN Document Server (European Organization For Nuclear Research): 73-106. <https://doi.org/10.5170/cern-2010-002.111>

- Fischer, M., Ramos-Sánchez, S., & Vaudrevange, P. K. (2013). Heterotic non-abelian orbifolds. *Journal of High Energy Physics*, 2013(7):80. [https://doi.org/10.1007/jhep07\(2013\)080](https://doi.org/10.1007/jhep07(2013)080)
- Fischer, M., Ratz, M., Torrado, J., & Vaudrevange, P. K. (2013). Classification of symmetric toroidal orbifolds. *Journal Of High Energy Physics*, 2013(1):84. [https://doi.org/10.1007/jhep01\(2013\)084](https://doi.org/10.1007/jhep01(2013)084)
- Hernández-Segura, M., & Ramos-Sánchez, S. (2025). Non-Abelian orbifolds of the SO(32) heterotic string. *Physical Review. D.*, 112(6): 066002. <https://doi.org/10.1103/1zqj-c9ty>
- 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>
- Kobayashi, T., Nilles, H. P., Plöger, F., Raby, S., & Ratz, M. (2007). Stringy origin of non-Abelian discrete flavor symmetries. *Nuclear Physics B*, 768(1–2): 135–156. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysb.2007.01.018>
- Konopka, S. J. H. (2013). Non-Abelian orbifold compactifications of the heterotic string. *Journal of High Energy Physics*, 2013(7):23. [https://doi.org/10.1007/jhep07\(2013\)023](https://doi.org/10.1007/jhep07(2013)023)
- Langacker, P. (2017). *The Standard Model and Beyond*. (Second edition). Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group. 636 Pp.
- Nilles, H. P., & 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., Ramos-Sánchez, S., Vaudrevange, P., & Wingerter, A. (2012). The orbifolder: A tool to study the low-energy effective theory of heterotic orbifolds. *Computer Physics Communications*, 183(6): 1363-1380. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2012.01.026>
- Olguín-Trejo, Y., Pérez-Martínez, R., & Ramos-Sánchez, S. (2018). Charting the flavor landscape of MSSM-like Abelian heterotic orbifolds. *Physical Review. D.*, 98(10): 106020. <https://doi.org/10.1103/physrevd.98.106020>
- Ramos-Sánchez, S. (2009). Towards low energy physics from the heterotic string. *Fortschritte Der Physik*, 57(10): 907-1036. <https://doi.org/10.1002/prop.200900073>
- Ramos-Sánchez, S. (2017). On flavor symmetries of phenomenologically viable string compactifications. *Journal of Physics Conference Series*, 912: 012011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/912/1/012011>
- Ramos-Sánchez, S., & Vaudrevange, P. K. S. (2019). Note on the space group selection rule for closed strings on orbifolds. *Journal of High Energy Physics*, 2019(1): 55. [https://doi.org/10.1007/jhep01\(2019\)055](https://doi.org/10.1007/jhep01(2019)055)

DEL GATO A LOS ELECTRONES: SCHRÖDINGER SE TOPA CON LA DFT

FROM CAT TO ELECTRONS: SCHRÖDINGER MEETS DFT

GONZÁLEZ MORENO, Fernanda
Itzel¹

BOUJNAH, Mourad²

MUSTRE DE LEÓN, José³

ESPINOSA FALLER, Francisco Javier⁴

CABALLERO BRIONES, Felipe¹

RESUMEN

Schrödinger trató de explicar los estados electrónicos encerrando hipotéticamente un gato en una caja. Entender el mundo invisible de los electrones es uno de los retos más grandes de la ciencia. Aunque no se pueden ver a los electrones directamente, como tampoco el gas dentro de un tanque, sus efectos lo determinan todo, desde la electricidad que alimenta los hogares hasta las reacciones químicas que suceden en el universo. La teoría del funcional de la densidad (DFT) surgió como una poderosa manera de estudiar estos actores invisibles concentrándose en una clave, la densidad electrónica. Este cambio conceptual, introducido por Hohenberg, Kohn y Sham transformó este campo, proporcionando un método práctico y cada vez más preciso para predecir el comportamiento de átomos, moléculas y materiales complejos. Actualmente, la DFT es el fundamento del diseño de materiales y la química teórica, habilitando a los científicos para poder explorar tecnologías propuestas incluso antes de que estas se lleven a la realidad. Sin embargo, algunos materiales prometedores pueden ser descartados prematuramente debido a las limitaciones inherentes de las aproximaciones utilizadas para el cálculo de sus propiedades. Esto ha motivado el desarrollo de nuevas herramientas, incluido el funcional de correlación de intercambio con la construcción de la estimación del valor de incertidumbre y estrategias modernas de validación basadas en active learning. Estos avances ayudan a validar predicciones, ofreciendo medidas de fiabilidad que hacen más fuerte y transparente el diseño computacional de materiales. Este artículo presenta una visión de la DFT, cómo trabaja, por qué se ha vuelto imprescindible, sus limitaciones y cómo algunos métodos emergentes pueden aproximar su incertidumbre para volver este método más confiable.

Palabras clave: DFT; métodos computacionales; Schrödinger; materiales avanzados.

1. Grupo GESMAT, Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Instituto Politécnico Nacional. Altamira, Tamaulipas, México.

2. Centro Nacional de Proyección Térmica, CINVESTAV. Querétaro, Querétaro, México.

3. Departamento de Física Aplicada, CINVESTAV. Mérida, Yucatán, México.

4. Escuela de Ingeniería, Universidad Marista de Mérida. Mérida, Yucatán, México.

Correspondencia
fcaballero@ipn.mx
<https://orcid.org/0000-0003-4340-1050>
Fecha de recepción
24 de noviembre de 2025.
Fecha de aceptación
14 de mayo de 2026.

ABSTRACT

Schrödinger tried to explain electronic states by hypothetically enclosing a cat in a box. Understanding the invisible world of electrons is one of the biggest challenges in science. Although electrons cannot be seen directly, nor can the gas inside a tank, their effects determine everything from the electricity that powers homes to the chemical reactions that happen in the universe. The density functional theory (DFT) emerged as a powerful way to study these invisible actors by concentrating on one key, electron density. This conceptual shift, introduced by Hohenberg, Kohn, and Sham, transformed this field, providing a practical and increasingly accurate method for predicting the behavior of complex atoms, molecules, and materials. Today, DFT is the foundation of materials design and theoretical chemistry, enabling scientists to explore proposed technologies even before they are brought to reality. However, some promising materials may be discarded prematurely due to the inherent limitations of the approximations used for the calculation of their properties. This has motivated the development of new tools, including the exchange correlation functional with the construction of the uncertainty value estimation and modern validation strategies based on active learning. These advances help validate predictions, offering reliability measures that make the computational design of materials stronger and more transparent. This article presents an overview of DFT, how it works, why it has become essential, its limitations, and how some emerging methods can approximate its uncertainty to make this method more reliable.

Keywords: DFT; computational methods; Schrödinger; advanced materials.

INTRODUCCIÓN

Tras la formulación de la ecuación de Schrödinger en 1926, al describir los estados electrónicos usando al famoso gato, la ciencia ha buscado caminos para entender el comportamiento de los electrones y predecir las propiedades de los materiales. Físicos y químicos lo han intentado durante décadas: desde modelos estadísticos para estudiar la distribución de los electrones en un átomo como la teoría Thomas-Fermi, hasta técnicas más precisas como la Hartree-Fock buscando satisfacer el principio de exclusión de Pauli. Sin

embargo, el gran cambio llegó en los años setenta, cuando Hohenberg y Kohn demostraron que toda la información en un sistema cuántico puede ser descrita sólo con la densidad electrónica. Poco después, Kohn y Sham transformaron esa idea, que incluso los llevó a ganar el premio Nobel en Química, en una práctica herramienta, siendo así como nació la teoría del funcional de la densidad (Microsoft Research, 2025).

La DFT permite modelar los estados cuánticos de la materia, resultando en una gran solución a un problema tan complejo. Incluso al mismo Schrödinger le hubiese resultado más fácil resolver, en vez de pensar en encerrar a un gato en una caja radiactiva imaginaria para intentar dilucidar su estado vivo/muerto (Villars 1986).

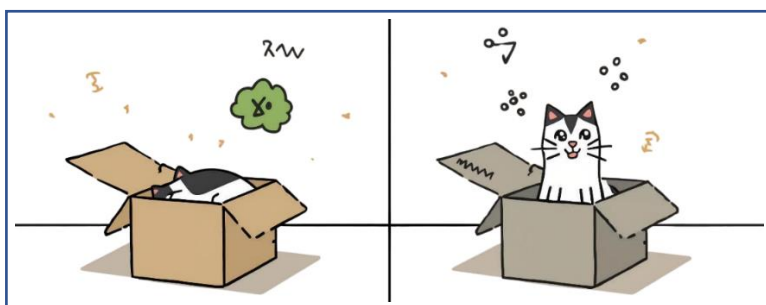


Figura 1. Imagen representativa de la paradoja del gato de Schrödinger.

Desde su nacimiento, la DFT ha evolucionado velozmente, primero con aproximaciones simples como la de la densidad local (LDA), después métodos refinados como las aproximaciones de gradiente generalizadas (GGA) y funcionales híbridos. Cada paso acerca a los científicos a cálculos más precisos sin depender de la función de onda desarrollada por Schrödinger, que es imposible de manejar para sistemas con muchos átomos (Nomura & Akashi, 2024). Ahora, casi un siglo después, hasta la inteligencia artificial se añade a esta historia, impulsando la DFT a una nueva era de velocidad y precisión.

PERO, ¿QUÉ ES LA DFT?

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 2. Ilustración representativa del gas conectado a la estufa para

Es aquí donde la DFT aparece. Esta teoría es un camino más fácil y efectivo que permite poder estudiar el mundo cuántico sin tener que resolver ecuaciones imposibles, como la de Schrödinger para muchos átomos, y sin recurrir a representaciones conceptuales complejas asociadas con la mecánica cuántica. Así, en lugar de estudiar cada electrón individualmente, cosa que aún representa un reto computacional, la DFT se enfoca en estudiar dónde es más probable encontrar un electrón, es decir, en la densidad electrónica, que se representa en la Figura 3. Construyendo una estructura que puede ser un cúmulo atómico, una molécula o un cristal, lo que sigue es modelar la densidad electrónica y a partir de ahí, todo lo demás.

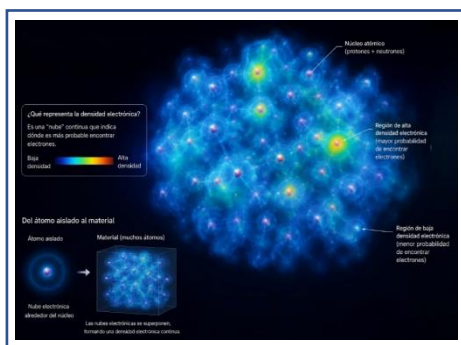


Figura 3. Imagen representativa de la densidad electrónica de un material.

En otras palabras, la DFT es una técnica que permite simular el comportamiento de un material en estudio y simular sus propiedades

electrónicas, ópticas, estructurales, térmicas, entre otras, basándose en el manejo de la densidad electrónica (Nikšić y col., 2011).

La DFT es una de las técnicas *ab initio*, o sea, las que parten de los primeros principios que explican las interacciones entre los electrones en los átomos, moléculas o materiales. Aunque las bases matemáticas de la DFT son complejas, tienen un propósito muy directo: permitir la predicción de las propiedades de un material sin haberlo fabricado antes. Desde la década de los años setenta la DFT ha sido utilizada en física del estado sólido, sin embargo, fue hasta los noventa cuando alcanzó la precisión necesaria para volverse una herramienta sumamente útil en la química y ciencia de los materiales. Su mayor ventaja es el equilibrio entre el costo computacional y la precisión, ofreciendo resultados muy confiables sin requerir grandes recursos, tanto materiales como económicos, que demandan los procedimientos experimentales tradicionales y los métodos de resolución de las ecuaciones cuánticas tradicionales.

La DFT no es una sola técnica sino un conjunto de metodologías que se adapta a distintos tipos de sistemas. Funciona muy bien con moléculas orgánicas y compuestos sencillos, pero también con sistemas más complejos como metales, catalizadores, películas delgadas, o sistemas electroquímicos (Ismail y col., 2024).

ENTONCES, ¿QUÉ SE PUEDE DESCUBRIR USANDO DFT?

Gracias a la DFT, es posible estudiar grandes moléculas, materiales avanzados, semiconductores para fotocatalisis y producción de hidrógeno, complejos metálicos, entre muchas cosas más (van Mourik y col., 2014). Permite traducir la conducta de un conjunto de electrones en información útil que permite crear nuevos materiales, entender reacciones químicas y diseñar nuevas tecnologías. Con esta herramienta es posible responder preguntas como: ¿cómo se organiza la nube electrónica en un material? ¿qué geometría adoptará una molécula? ¿qué tan estable es un estado magnético? ¿cómo fluye la carga o el espín? ¿cuánta energía necesita una reacción química para ocurrir? ¡una amplia variedad de fenómenos! Ofrece también técnicas

adicionales que ayudan a representar sistemas reales como calcular el spin polarizado, modelos de campo electrostático, métodos para emular ambientes extendidos y acoplamiento con regiones cuánticas más pequeñas cuando un material es muy grande para ser simulado completamente (Noodleman y col., 2003). La DFT no solo aplica para estados fundamentales, estáticos, sino que usando variantes como la DFT dependiente del tiempo (TDDFT), es posible estudiar propiedades electrónicas excitadas, relevantes para la fotónica, sensores y materiales optoelectrónicos.

Actualmente los programas disponibles para trabajar con DFT se han vuelto tan potentes que es posible guiar a los usuarios a cálculos complejos solo con aplicar algunos comandos sin necesidad de entender completamente las ecuaciones avanzadas (cómo la de Schrödinger) e incluso existen ya interfases gráficas que permiten prescindir de los comandos ofreciendo entornos más amigables con el usuario.

¿SE PUEDE CONFIAR EN LA DFT PARA CREAR TECNOLOGÍAS QUE AÚN SON IDEAS?

Si, se puede confiar en la DFT, pero solo entendiendo sus limitaciones y aprendiendo cómo medir la incertidumbre en los resultados que ofrece.

La DFT, en especial en su forma más común (GGA), se utiliza de forma cotidiana para descubrir materiales mediante grandes búsquedas que eliminan técnicas poco prometedoras y conservan sólo aquellos que presentan mejores resultados para estudiarlos con mayor profundidad. En esa primera etapa la DFT funciona muy bien y presenta resultados muy confiables. No obstante, aparece un problema de gran importancia: aunque la DFT casi nunca se equivoca ayudando a descartar las malas propuestas, a veces también descarta por error las buenas debido a la incertidumbre en sus predicciones. Entonces, si se quiere diseñar tecnologías que aún son sólo ideas, esa incertidumbre importa muchísimo.

Es por eso por lo que han surgido funcionales como BEEF-vdW que estiman automáticamente su propia incertidumbre. Esto permite saber la confiabilidad de la predicción, en lugar de tomar el resultado como una verdad absoluta. Este enfoque se ha usado, por ejemplo, para estimar la incertidumbre del estado magnético fundamental de diversos materiales, y para calcular un

indicador denominado c-value, que mide el nivel de confianza de una predicción (Houchins & Viswanathan, 2017). Sin ese dato, cualquier afirmación sobre datos magnéticos obtenida en DFT por medio del funcional GGA queda incompleta. Pero la comunidad científica ha identificado otro reto...

¿CÓMO SE PUEDE VALIDAR QUE LOS FUNCIONALES DE DFT REALMENTE FUNCIONAN?

Para generar resultados, DFT suele utilizar bases de datos de referencia, también llamados benchmark sets, pero muchas de ellas se han elaborado con poco rigor, o con sesgos que limitan su utilidad para espacios más amplios de materiales o reacciones químicas.

Para remediar esto, una investigación reciente ha propuesto una solución basada en *active learning* (Alfonso-Ramos y col., 2025), que toma un conjunto de referencia iniciales, denominado BH9, para construir un espacio químico más amplio de reacciones. Entrenando un modelo capaz de predecir la divergencia que existe en veinte diferentes funciones de DFT, se exploró completamente el espacio químico y fueron seleccionadas automáticamente las reacciones más desafiantes, es decir, aquellas donde los funcionales presentan una mayor diferencia. Los autores descubrieron que la relación entre la estructura molecular y la divergencia funcional es altamente asimilable, y utilizando menos de cien reacciones nuevas, lograron construir un conjunto de validación con mayor representatividad y exigencia que, incluso, modifica las conclusiones sobre el rendimiento real de diversos funcionales respecto al conjunto original.

Se puede confiar en la DFT para la exploración de tecnologías inexistentes, siempre y cuando las predicciones se acompañen de una evaluación rigurosa del valor de incertidumbre con validaciones bien construidas. Además, al incorporar criterios como el c-value, funcionales con estimación de error y conjuntos de validación creados mediante *active learning*, la DFT se vuelve más confiable, robusta y predictiva, lo que incrementa de forma considerable la probabilidad de identificar materiales y reacciones realmente prometedoras antes de invertir tiempo y recursos en investigación experimental.

CONCLUSIÓN

La DFT o teoría del funcional de la densidad desarrollada por Hohenberg, Kohn y Sham, nació para ofrecer una manera inteligente y computacionalmente asequible para describir el comportamiento de los electrones presentes en toda la materia, que a su vez determinan los fenómenos eléctricos, magnéticos, u ópticos que se observan cotidianamente. La DFT es el puente que permite entender lo que se observa con lo que es complicado de resolver, como la ecuación de Schrödinger para muchos átomos.

Actualmente la DFT se ha convertido en una herramienta indispensable para el diseño de materiales y tecnologías que aún no existen. Sin embargo, no es infalible: aunque descarta rápidamente malas ideas, a veces también resulta contraproducente cuando descarta tecnologías realmente promete-doras. Por ello surgieron funcionales y técnicas de validación que permiten medir la fiabilidad de los cálculos, corregir errores y mejorar la capacidad de predecir correctamente, incluso en sistemas complejos, el error de cálculo, para avanzar hacia la elaboración de materiales más eficientes e inteligentes que, por el momento, solo existen en simulaciones.

La DFT no solo ayuda a estudiar lo invisible, también enseña que, incluso en la ciencia, la certeza no es absoluta, y que la claridad en el cálculo de la incertidumbre es lo que permite construir con mayor precisión el mundo del futuro.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado por el Proyecto 202503050N del Laboratorio Nacional de Supercómputo del Sureste de México, el proyecto SIP-IPN 2026-0774 y el proyecto SIP de innovación de alumnos del Instituto Politécnico Nacional 2025-A047.

REFERENCIAS

- Alfonso-Ramos, J. E., Adamo, C., Brémond, É. & Stuyver, T. (2025). Improving the reliability of, and confidence in, DFT functional benchmarking through active learning. *Journal of Chemical Theory and Computation*, 21(4): 1752–1761. DOI: 10.1021/acs.jctc.4c01729.
- Houchins, G. & Viswanathan, V. (2017). Quantifying confidence in density functional theory predictions of magnetic ground states. *Physical Review B*, 96(13). DOI: 10.1103/PhysRevB.96.134426.
- Ismail, F. M. D., Nahar, L. & Sarker, S. D. (2024). Prediction of structure based on spectral data using computational techniques. In *Computational Phytochemistry* (pp. 255–300). Elsevier.
- Microsoft Research. Timeline: The continuing evolution of density functional theory. (2025). [En línea]. Disponible en: <https://www.microsoft.com/en-us/research/articles/timeline-the-continuing-evolution-of-density-functional-theory/>. Fecha de consulta: 11 de mayo de 2026.
- Nikšić, T., Vretenar, D. & Ring, P. (2011). Relativistic nuclear energy density functionals: Mean-field and beyond. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 66(3): 519–548. DOI: 10.1016/j.ppnp.2011.01.055.
- Nomura, Y. & Akashi, R. (2024). Density functional theory. In *Encyclopedia of Condensed Matter Physics* (pp. 867–878). Elsevier.
- Noodleman, L., Lovell, T., Han, W.-G., Liu, T., Torres, R. A. & Himo, F. (2003). Density functional theory. In *Comprehensive Coordination Chemistry II* (pp. 491–510). Elsevier.
- Van Mourik, T., Bühl, M. & Gageot, M.-P. (2014). Density functional theory across chemistry, physics and biology. *Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 372(2011): 20120488. DOI: 10.1098/rsta.2012.0488.
- Villars, C. N. (1986). The paradox of Schrodinger's cat. *Physics Education*, 21(4): 232–237. DOI: 10.1088/0031-9120/21/4/007.

UNA NUEVA ERA PARA EL TRATAMIENTO DEL ACNÉ: LIBERACIÓN CONTROLADA DE MEDICAMENTOS MEDIANTE BIOPOLÍMEROS

A NEW ERA FOR ACNE TREATMENT: EXTENDED-RELEASE
MEDICATION THROUGH BIOPOLYMERS

SALAZAR CASTILLO, Abril ¹

FARÍAS CEPEDA, Lorena ¹

CASTAÑEDA FACIO, Adalí Oliva ¹

ROSALES MARINES, Lucero ¹

OVANDO MEDINA, Víctor Manuel ²

RESUMEN

El acné vulgaris afecta a 9.4 % de la población mundial con impactos físicos y psicológicos significativos. Los tratamientos convencionales presentan efectos secundarios, resistencia bacteriana y aplicaciones prolongadas que no siempre son eficaces. Este artículo explora el uso de biopolímeros en sistemas de liberación transdérmica como alternativa innovadora para el tratamiento de afecciones dermatológicas, con énfasis en el acné. Se analizan cinco biopolímeros principales (quitano, alginato, gelatina, nanocelulosa y colágeno), destacando su biocompatibilidad, biodegradabilidad y su capacidad para formar matrices inteligentes para la liberación controlada de fármacos. Estas matrices permiten una liberación dual de principios activos, combinando una acción rápida y sostenida contra *Cutibacterium acnes*. Además, se examinan la estructura cutánea, las vías de penetración y los métodos de liberación. Actualmente, persisten desafíos en el escalamiento industrial, la estabilidad de las formulaciones y la regulación. El futuro radica en la integración de biopolímeros, nanotecnología y medicina personalizada, lo que posiciona a estos sistemas como una revolución prometedora en la dermatología moderna.

Palabras clave: biopolímeros; liberación de fármacos; acné; dermatología.

ABSTRACT

Acne vulgaris affects 9.4% of the global population, with significant physical and psychological impacts. Conventional treatments often lead to side effects, bacterial resistance, and prolonged applications that are not always effective.

1. Facultad de Ciencias Químicas,
Universidad Autónoma de
Coahuila. Saltillo, Coahuila,
México.

2. Unidad Académica
Multidisciplinaria Región Altiplano.
Matehuala, San Luis Potosí,
México.

Correspondencia

lorenafarias@uadec.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0001-7835-9628>

Fecha de recepción

26 de noviembre de 2025.

Fecha de aceptación

5 de mayo de 2026.

*This article explores the use of biopolymers in transdermal drug delivery systems as an innovative alternative for treating dermatological conditions, focusing on acne. Five key biopolymers (chitosan, alginate, gelatin, nanocellulose, and collagen) are analyzed for their biocompatibility, biodegradability, and ability to form smart matrices for controlled drug release. These matrices enable dual release of active ingredients, combining rapid and sustained action against *Cutibacterium acnes*. Additionally, the article examines skin structure, penetration pathways, and delivery methods. Current challenges include industrial scaling, formulation stability, and regulatory issues. The future lies in integrating biopolymers, nanotechnology, and personalized medicine, positioning these systems as a promising revolution in modern dermatology.*

Keywords: *biopolymers; drug delivery; acne; dermatology.*

INTRODUCCIÓN

Las enfermedades de la piel como el acné, la alopecia, las úlceras, la dermatitis atópica, infecciones por hongos y bacterias, la psoriasis, la urticaria, y otras enfermedades subcutáneas, han aumentado anualmente un 46.8 % entre 1990 y 2017 (Giesey col., 2021; Yakupu col., 2023). Una de las afecciones más comunes es el acné vulgaris que afecta a un 9.4 % de la población (Tan & Bhate, 2015), con aproximadamente 117.4 millones de casos nuevos y 231.2 millones de casos prevalentes a nivel mundial (Chen col., 2022), especialmente entre los 16 a 24 años y uno de cada cinco adultos entre los 25 y 39 (Saurat col., 2024).

Se presenta con inflamación de la piel, comedones, pápulas, pústulas, nódulos y quistes (Gurung & Badola, 2023), aumenta la producción de sebo, hiperquebrantiza el infundíbulo folicular y favorece la proliferación de *Cutibacterium acnes*, desencadenando una respuesta inflamatoria (Vaglio & Céspedes, 2020). Pero no solo tiene impacto físico, sino también emocional y psicológico, generando ansiedad, depresión, baja autoestima, aislamiento social, trastornos alimentarios, dismorfia corporal, dermatilomanía e incluso riesgo de suicidio (Bewley col., 2021). Actualmente, los tratamientos convencionales más utilizados combinan los tópicos y los orales porque aportan, respectivamente, sus propiedades antiinflamatorias y su resistencia



bacteriana (Qothrunnadaa & Hasanah, 2021; Vaglio & Céspedes, 2020). Sin embargo, se recetan de manera prolongada, lo que puede provocar la aparición de otros tipos de enfermedades, como la faringitis, la candida o la infección por *Clostridium* (Qothrunnadaa & Hasanah, 2021).

Ante esta problemática, han surgido productos innovadores como los parches transdérmicos, que mediante un sistema de liberación transdérmica proporcionan efectos prolongados, prevención antibacteriana y comodidad para el consumidor (Prasetyo col., 2025). Estos sistemas suelen emplear polímeros o biopolímeros, que son materiales sintéticos o de origen natural por ser adhesivos, terapéuticos potenciales y capaces de modificar (Desai col., 2025). Específicamente, el uso de biopolímeros presenta ventajas al ser biodegradables, biodisponibles, no tóxicos, de bajo costo y con una probabilidad nula o baja de irritación cutánea (Güngör col., 2020).

El objetivo de este artículo es presentar una visión general acerca de los sistemas de liberación transdérmica basados en biopolímeros y sus ventajas para el tratamiento del acné y su comparación con sistemas convencionales para afecciones dermatológicas, identificando la necesidad de su tratamiento, así como los retos de su implementación.

LA PIEL COMO BARRERA

La piel es el órgano más grande del cuerpo humano, actúa como una barrera biológica y está compuesta por la epidermis, dermis e hipodermis. La epidermis, la capa más superficial, tiene cuatro subcapas: córnea, granulosa, espinosa y basal, en esta última se encuentran melanocitos, células precursoras de queratinocitos y células de Langerhans, que renuevan continuamente la epidermis (Bakhrushina col., 2025; Montes Belloso, 2023). Los queratinocitos de las capas espinosa y granulosa, acumulan queratina para formar la capa córnea, siendo la capa más importante porque protege a la piel de agresiones externas, la hidrata, restringe moléculas hidrofílicas y defiende contra patógenos (Bakhrushina col., 2025; Montes Belloso, 2023). La dermis proporciona sustento físico y nutrientes a la piel, la cual está compuesta por glándulas sudoríparas, folículos pilosos, terminaciones nerviosas, vasos linfáticos y fibroblastos; estos últimos producen colágeno y elastina, lo que confiere elasticidad y resistencia a la piel, así como facilidad

para la administración transdérmica de fármacos (Bakhrushina col., 2025; Montes Belloso, 2023). La hipodermis, la capa más profunda, se compone de tejido adiposo, fibras de colágeno y elastina (en menor cantidad que en la dermis) y funciona como reserva energética, amortiguador y aislante térmico (Bakhrushina col., 2025; Montes Belloso, 2023). En la Figura 1 se muestra un esquema de las capas de la piel y de las vías de absorción transdérmica.

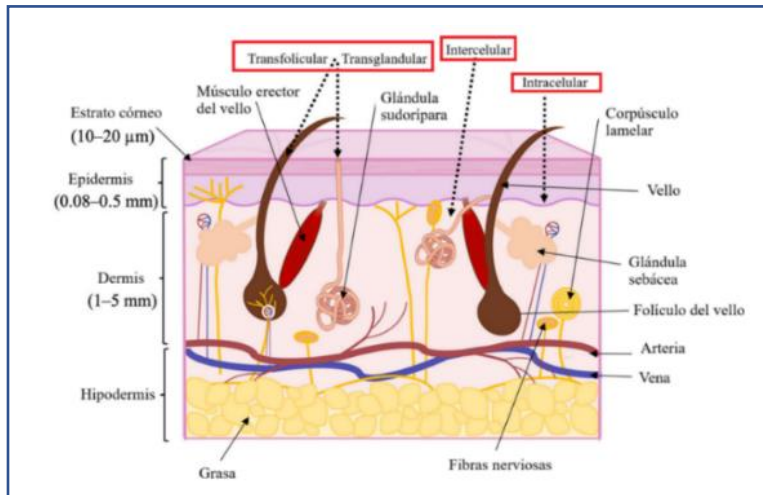


Figura 1. Esquema de la piel humana y las principales vías de penetración para sistemas transdérmicos de liberación de fármacos (Bakhrushina col., 2025).

LIBERACIÓN Y ABSORCIÓN TRANSDÉRMICA DE FÁRMACOS

Comprender la estructura de la piel es fundamental para analizar cómo los medicamentos pueden atravesarla. El estrato córneo es la mayor barrera para la absorción de fármacos, ya que el medicamento debe penetrar en esta capa y difundirse a través de las demás.

En la Tabla 1, se mencionan las tres vías de absorción transdérmica.



Tabla 1. Comparativa de las vías de absorción transdérmica de fármacos (Bakhrushina col., 2025; Kim col., 2020; Yu col., 2021).

Parámetro	Vía transcelular	Vía Intercelular	Vía transfolicular/transglandular
Camino	A través del interior de las células	A través de los espacios interlamelares y lípidos entre corneocitos	A través de folículos/glándulas con un inicio rápido de acción
Facilitación de transporte	No facilita difusión	Permite migración e inserción	Contribuye limitadamente a la permeación
Moléculas favorecidas	Pequeñas hidrofílicas	Lipídicas, anfifílicas e hidrofílicas	Iones, moléculas polares grandes, polímeros, partículas coloidales
Limitaciones	Alta resistencia inter/intra - corneocitaria	Barrera lipídica del estrato córneo y polaridad	Baja proporción del área total de la piel (1% de la superficie)

La liberación transdérmica de fármacos se presenta como una opción superior frente a tratamientos tradicionales, como cremas, ungüentos u orales. Cuenta con ventajas como la liberación constante y controlada del principio activo, la evasión del metabolismo hepático y la degradación por el ácido del tracto intestinal, y, por ser menos invasivos, genera comodidad para los pacientes (Alkilani col., 2022). Sin embargo, algunos parámetros afectan la eficacia de la liberación, como los factores fisiológicos (hidratación de la piel, temperatura corporal o edad) y las propiedades fisicoquímicas del fármaco (tamaño molecular < 500 Da, solubilidad, lipofilia, punto de fusión y dosis). Dado que no todos los fármacos cumplen estos criterios, se han desarrollado métodos que mejoran la penetración cutánea, clasificándose en métodos químicos, físicos y nanotecnológicos, o bien, liberación pasiva o activa (Bakhrushina col., 2025).

- Liberación pasiva/química: biodegradación, disolución o difusión de manera natural del fármaco desde los sistemas de administración hacia la piel; dependiendo de propiedades de formulación, dosis de compuesto activo y condiciones de la piel (He col., 2023). Se deben a la modificación del fármaco o a mejoras químicas (Yu col., 2021).
- Liberación activa/física: se aplican estímulos como la electricidad, el ultrasonido o la luz. Su eficiencia depende del control de parámetros del estímulo y propiedades del fármaco (He col., 2023).
- Permeabilidad nanotecnológica: uso de estructuras coloidales

(diámetro < 500 nanómetros) que mejoran la difusión del fármaco, la estabilidad fisicoquímica en nanopartículas y la liberación sostenida y controlada del principio activo (Yu col., 2021).

BIOPOLÍMEROS, LA NUEVA REVOLUCIÓN EN DERMATOLOGÍA

Los biopolímeros son macromoléculas obtenidas a partir de seres vivos (plantas, animales o microorganismos) compuestas de bloques químicos repetidos, son derivados de recursos renovables y capaces de descomponerse en el medio ambiente (Das col., 2023). Adicionalmente, si se obtienen a partir de residuos vegetales (nanocelulosa) o animales (gelatina), constituyen una alternativa responsable, ecológica, sostenible, económica y no contaminante (Yilmaz col., 2023). Son innovadores y sostenibles por su biodisponibilidad, origen renovable, naturaleza no tóxica, biodegradabilidad, facilidad de funcionalización, biocompatibilidad y bajo impacto ambiental, por ello, son utilizados en diversas aplicaciones (Dutta & Sit, 2024). Se utilizan en dermatología mediante la administración transdérmica de fármacos, ya que presentan propiedades antiinflamatorias, antimicrobianas y cicatrizantes, por su semejanza estructural con la matriz extracelular de los tejidos (Yilmaz col., 2023), es decir, el soporte natural que mantiene y organiza las células. En la Tabla 2 se mencionan las características de algunos de los biopolímeros más utilizados en dermatología, los cuales son; quitosano, alginato, gelatina, nanocelulosa y colágeno. Asimismo, proporcionan una liberación controlada-localizada del fármaco, liberándolo poco a poco en donde se requiere, según las matrices empleadas (estructuras elaboradas con estos biopolímeros) y los componentes activos a liberar; modulan la cinética de liberación, protegen contra infecciones, retienen agua y mejoran la penetración (Kuo col., 2021; Zaid Alkilani col., 2024), reducen efectos secundarios asociados a la administración oral de antibióticos (náuseas y esofagitis) al evitar el paso gastrointestinal y el metabolismo hepático (Wong col., 2023).

Tabla 2. Características principales de cinco biopolímeros utilizados en la liberación transdérmica de fármacos

Biopolímero	Origen	Propiedades clave	Aplicación dermatológica	Referencias
Quitosano	Desacetilación de quitina	Biocompatible, antibacteriano, antioxidante, mucoadhesivo, no tóxico	Acné, leishmaniasis, psoriasis, cáncer, cicatrización de heridas	(Kuo col., 2021; Mitura col., 2020; Zanganeh col., 2023)
Alginato	Algas marinas (ácido algínico)	Biodegradable, bioadhesivo, hidrosoluble, anti-inflamatorio, absorbente, antioxidante	Cáncer, acné, cicatrización de heridas	(Abasalizadeh col., 2020; Abourehab col., 2022)
Gelatina	Colágeno de tejidos animales	Biocompatible, biodegradable y fácil para procesamiento	Cicatrización de heridas, cáncer, dolor agudo y crónico	(Bahmani col., 2025; Yilmaz col., 2023)
Nano-celulosa	Fuente biotecnológica o bacterias	Liviana, biocompatible, bajo costo, permeable, superficie modificable y biodegradable	Cicatrización de heridas, acné, liberación de fármacos	(Ciolacu col., 2020; Leong col., 2023; Liu col., 2021)
Colágeno	Piel, tendones, ligamentos, cartílagos	Biocompatible, flexible, con similitud a matriz extracelular	Reducción de arrugas, hidratación, cicatrización de heridas, psoriasis	(Yilmaz col., 2023; Zhu col., 2022)

Estos biopolímeros forman matrices tridimensionales que encapsulan, protegen y liberan agentes activos controladamente, reduciendo su toxicidad (Das col., 2023); conocidas como matrices inteligentes porque responden a estímulos específicos biológicos o condiciones patológicas (Zhang & Wu, 2023), como cambios en el cuerpo o señales de enfermedad, liberando el medicamento.

En la Tabla 3 se presentan las matrices más comunes de estos biopolímeros.

Tabla 3. Principales matrices de biopolímeros para la liberación transdérmica de fármacos

Sistema de liberación / matriz	Qué son	Características principales	Aplicaciones	Referencias
Hidrogeles	Redes poliméricas entre-cruzadas	Gelifican en agua, retienen >10% de su peso, biocompatibles, liberación controlada, similares a tejido humano	Máscaras faciales, higiene super-absorbente, liberación de fármacos en piel	(Kim col., 2020; Mitura col., 2020)
Parches cutáneos y apósitos	Parches multicapa con fármaco con/sin adhesivo	No invasivos, uso prolongado, liberación pasiva o activa	Diabetes, acné, heridas, anti-concepción	(He col., 2023; Wong col., 2023)
Nano-compositos	Estructuras de nano-partículas con polímeros	Aumentan permeabilidad cutánea, liberación precisa, eficacia, no invasivos	Administración transdérmica avanzada en parches inteligentes	(Mohan col., 2025)
Micro-cápsulas	Vesículas con surfactantes n o iónicos	Penetran la piel, mejoran estabilidad, liberación controlada, producción a gran escala	Cosmética y farmacéutica, protección de activos	(Bai col., 2024; Mohan col., 2025)

IMPORTANCIA DEL TRATAMIENTO DEL ACNÉ

Con base en la investigación de Yakupu A. y colaboradores, las enfermedades micóticas, la dermatitis y las infecciones bacterianas registraron las tasas más altas de incidencia, discapacidad y mortalidad por edad, respectivamente. Sin embargo, el acné vulgaris destacó por presentar un crecimiento significativo en estas tres métricas (18 %, 16 % y 6 %, respectivamente) en comparación con las demás (Yakupu col., 2023). El acné es una enfermedad inflamatoria crónica de la unidad polisebácea, de origen multifactorial. Causada principalmente por la proliferación de la bacteria Cutibacterium acnes en los folículos polisebáceos, dañando tejidos, rompiendo la pared folicular o lesiones en la piel como comedones abiertos o cerrados, pápulas, pústulas y

nódulos (Kuo col., 2021; Qothrunnadaa & Hasanah, 2021). Los antibióticos orales son utilizados desde hace seis décadas para el tratamiento del acné vulgar, siendo las tetraciclinas las más recetadas, aplicándose en terapias prolongadas, no obstante, se deben tener cuidados para prevenir enfermedades como la faringitis, candida o infección por *Clostridium* (Del Rosso, 2015; Qothrunnadaa & Hasanah, 2021). Por ello, es necesario contar con terapias más eficaces para su tratamiento. En este sentido, el uso de la vía transdérmica es una alternativa prometedora para el tratamiento del acné utilizando la liberación dual de fármacos (capacidad de liberar en una matriz dos o más principios activos de manera rápida y luego sostenida) a comparación de los tratamientos convencionales (Lopez-Ramirez col., 2021), en la Figura 2 se muestran las ventajas del uso de biopolímeros como matrices de liberación de fármacos por vía transdérmica a comparación de tratamientos convencionales. Actualmente, los parches para el acné tienen una gran demanda debido a su capacidad para tratar y ocultar el acné, y son fáciles de usar, adquirir y transportar (Qothrunnadaa & Hasanah, 2021). Por ello, los parches transdérmicos elaborados con biopolímeros son una buena opción para su tratamiento.

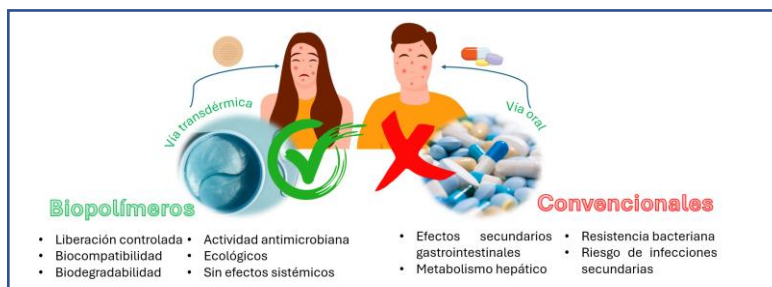


Figura 2. Ventajas de los biopolímeros como vía transdérmica frente a los tratamientos convencionales.

Bao Lam Thai Tran col., formularon películas nanocompuestas de AgNPs–Alg–Chi con liberación de clindamicina (antibiótico), con una concentración mínima inhibitoria (MIC) de 3.67 a 5.50 mg/mL frente a cepas de *Cutibacterium acné* demostrando actividad antibacteriana y biocompatibilidad (Thai Tran col., 2024). Asimismo, Chi-Wen Kuo col. desarrollaron parches bicapa cargados con extractos de *Cortex Phellodendron amurense* y *Centella asiática* de gelatina/quitosano, mostrando retención de agua, actividad antibacteriana contra *Cutibacterium acnes* (MIC 150 μ g/Ml) y biocompatibilidad (Kuo col., 2021). En la Figura 3 se muestra el



parche que utilizaron y su efecto anti-microbiano. También se desarrolló un parche transdérmico de quitosano con liberación dual de doxiciclina y nanopartículas de selenio (SeN), con liberaciones de 86.4 % de doxiciclina y 86.2 % de SeN, resultando en una mejora de la reparación de tejidos (Altememy Col., 2022).

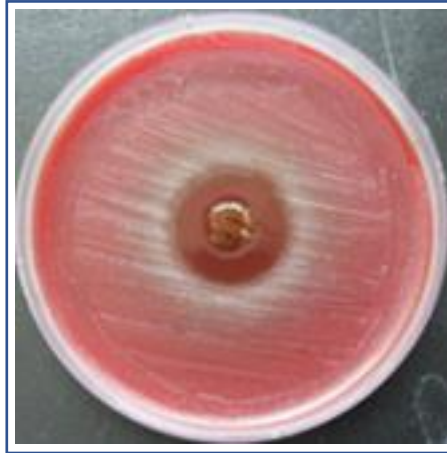


Figura 3. Fotografía de un parche antiacné de gelatina/quitosano (GC) cargado con *Phellodendron amurense* y *Centella asiática* (Kuo, 2021).

DESAFÍOS Y PERSPECTIVAS FUTURAS

Los biopolímeros y su uso en sistemas transdérmicos enfrentan desafíos como escalamiento industrial, producción de nanopartículas estables y limitada absorción o liberación de ciertos fármacos (Tapfumaneyi col., 2022). En el caso de los antibióticos, la resistencia bacteriana, penetración limitada y sus regulaciones estrictas requieren estudios preclínicos y clínicos (Zaid Alkilani col., 2024). El futuro radica en una integración sinérgica entre biopolímeros, nanotecnología y medicina personalizada con estrategias físicas y químicas capaces de tratar enfermedades cutáneas (Wong col., 2023; Zaid Alkilani col., 2024). Donde la economía circular y la síntesis verde prometen productos ambientalmente responsables y económicamente accesibles (Yilmaz col., 2023).

CONCLUSIONES

Este artículo ha visualizado de manera general, mediante la comprensión de la estructura de la piel y las vías de liberación y absorción de fármacos por vía transdérmica, el uso de biopolímeros como una solución innovadora para el



tratamiento del acné al mencionar la importancia de esta enfermedad, y destacando sus propiedades con aplicación dermatológica como la biocompatibilidad, capacidad de liberación controlada, reducción de efectos adversos y sostenibilidad ambiental. Donde, en conjunto con la liberación dual, permiten acción antibacteriana inmediata con efecto antiinflamatorio prolongado, optimizando los resultados en comparación con tratamientos orales y tópicos convencionales. No obstante, existen desafíos críticos en el escalamiento industrial, la estabilidad de principios activos, la regulación de compuestos emergentes y el desarrollo de nanosistemas optimizados para la penetración cutánea, los cuales deben ser supervisados para su aplicación clínica.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Coahuila por fomentar la investigación, a los autores por su cooperación y a SECIHTI por el apoyo mediante la beca número 2085676.

REFERENCIAS

- Abasalizadeh, F., Moghaddam, S. V., Alizadeh, E., Akbari, E., Kashani, E., Fazljou, S. M. B., Torbati, M., & Akbarzadeh, A. (2020). Alginate-based hydrogels as drug delivery vehicles in cancer treatment and their applications in wound dressing and 3D bioprinting. *Journal of Biological Engineering*, 14(1): 8. <https://doi.org/10.1186/S13036-020-0227-7>
- Abourehab, M. A. S., Rajendran, R. R., Singh, A., Pramanik, S., Shrivastav, P., Ansari, M. J., Manne, R., Amaral, L. S., & Deepak, A. (2022). Alginate as a Promising Biopolymer in Drug Delivery and Wound Healing: A Review of the State-of-the-Art. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(16): 9035-9092. <https://doi.org/10.3390/IJMS23169035>
- Alkilani, A. Z., Nasereddin, J., Hamed, R., Nimrawi, S., Hussein, G., Abo-Zour, H., & Donnelly, R. F. (2022). Beneath the Skin: A Review of Current Trends and Future Prospects of



Transdermal Drug Delivery Systems. *Pharmaceutics*, 14(6): 1152-1186. <https://doi.org/10.3390/PHARMACEUTICS14061152>

Altememy, D., Javdani, M., Khosravian, P., Khosravi, A., Khorasgani, M., Altememy, D., Javdani, M., Khosravian, P., Khosravi, A., & Khorasgani, E. M. (2022). Preparation of Transdermal Patch Containing Selenium Nanoparticles Loaded with Doxycycline and Evaluation of Skin Wound Healing in a Rat Model. *Pharmaceutical*, 15(11): 1381-1399. <https://doi.org/10.3390/PH15111381>

Bahmani, S., Khajavi, R., Ehsani, M., Rahimi, M. K., & Kalaei, M. R. (2025). A development of a gelatin and sodium carboxymethyl cellulose hydrogel system for dual-release transdermal delivery of lidocaine hydrochloride. *International Journal of Biological Macromolecules*, 284: 138034. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2024.138034>

Bai, D., Chen, H., Liu, L., Xiang, N., Zhang, J., Wu, C., Zhang, J., & Wang, F. (2024). Ionic liquid microcapsules for the topical delivery of pterostilbene: Enhanced transdermal delivery and anti-wrinkle and skin brightening effects. *Journal of Molecular Liquids*, 395: 123842. <https://doi.org/10.1016/J.MOLLIQ.2023.123842>

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., & 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>

Bewley, A., Lepping, P., & Taylor, R. E. (2021). *Psychodermatology in clinical practice*. Pp. 1–441, Springer, NY. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-54307-5/COVER>

Chen, H., Zhang, T. C., Yin, X. L., Man, J. Y., Yang, X. R., & Lu, M. (2022). Magnitude and temporal trend of acne vulgaris burden in 204 countries and territories from 1990 to 2019: an analysis from the Global Burden of Disease Study 2019. *British Journal of Dermatology*, 186(4): 673–683. <https://doi.org/10.1111/BJD.20882>

Ciolacu, D. E., Nicu, R., & Ciolacu, F. (2020). Cellulose-Based Hydrogels as Sustained Drug-Delivery Systems. *Materials*, 13(22): 5270-5307. <https://doi.org/10.3390/MA13225270>

Das, A., Ringu, T., Ghosh, S., & Pramanik, N. (2023). A comprehensive review on recent advances in preparation, physicochemical characterization, and bioengineering applications of biopolymers. *Polymer Bulletin* (Berlin, Germany), 80(7): 7247–7312. <https://doi.org/10.1007/S00289-022-04443-4>

Del Rosso, J. Q. (2015). Oral Doxycycline in the Management of Acne Vulgaris: Current Perspectives on Clinical Use and Recent Findings with a New Double-scored Small Tablet Formulation. *The Journal of Clinical and Aesthetic Dermatology*, 8(5), 19-26. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4445892/>

- Desai, S. R., Bhagwat, D. A., Singh, A. K., Kumbhar, R. B., & Khan, J. (2025). Bioadhesive polymers in transdermal formulations for skin disorders. *Current Opinion in Pharmacology*, 83: 102544. <https://doi.org/10.1016/j.coph.2025.102544>
- Dutta, D., & Sit, N. (2024). A comprehensive review on types and properties of biopolymers as sustainable bio-based alternatives for packaging. *Food Biomacromolecules*, 1(2): 58–87. <https://doi.org/10.1002/FOB2.12019>
- Giesey, R. L., Mehrmal, S., Uppal, P., & Delost, G. R. (2021). The Global Burden of skin and subcutaneous disease: a longitudinal analysis from the global burden of disease study from 1990-2017. *Journal of Cutaneous Medicine*, 5(2): 125–136. <https://doi.org/10.25251/SKIN.5.2.7>
- Güngör, S., Kahraman, E., Erdal, M. S., & Özsoy, Y. (2020). Chapter 8. Recent advances in biopolymer-based transdermal patches. In: *Biopolymer Membranes and Films: Health, Food, Environment, and Energy Applications*, Pp. 195–217, Elsevier, NY. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818134-8.00008-0>
- Gurung, A., & Badola, A. (2023). An updated review on acne. *World Journal of Biology Pharmacy and Health Sciences*, 14(03): 300–317. <https://doi.org/10.30574/wjbpshs.2023.14.3.0266>
- He, J., Zhang, Y., Yu, X., & Xu, C. (2023). Wearable patches for transdermal drug delivery. *Acta Pharmaceutica Sinica. B*, 13(6): 2298–2309. <https://doi.org/10.1016/J.APB.2023.05.009>
- Kim, B., Cho, H.-E., Moon, S. H., Ahn, H.-J., Bae, S., Cho, H.-D., & An, S. (2020). Transdermal delivery systems in cosmetics. *Biomedical Dermatology*, 4(1): 10. <https://doi.org/10.1186/S41702-020-0058-7>
- Kuo, C. W., Chiu, Y. F., Wu, M. H., Li, M. H., Wu, C. N., Chen, W. S., & Huang, C. H. (2021). Gelatin/Chitosan Bilayer Patches Loaded with Cortex Phellodendron amurense/ Centella asiatica Extracts for Anti-Acne Application. *Polymers*, 13(4): 1–15. <https://doi.org/10.3390/POLYM13040579>
- Leong, M. Y., Kong, Y. L., Burgess, K., Wong, W. F., Sethi, G., & Looi, C. Y. (2023). Recent Development of Nanomaterials for Transdermal Drug Delivery. *Biomedicines*, 11(4): 1124. <https://doi.org/10.3390/BIMEDICINES11041124>
- Liu, S., Qamar, S. A., Qamar, M., Basharat, K., & Bilal, M. (2021). Engineered nanocellulose-based hydrogels for smart drug delivery applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 181: 275–290. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2021.03.147>
- Lopez-Ramirez, M. A., Kupor, D., Marchiori, L., Soto, F., Rueda, R., Reynoso, M., Narra, L. R., Chakravarthy, K., & Wang, J. (2021). Combinatorial microneedle patch with tunable release kinetics and dual fast-deep/sustained release capabilities. *Journal of Materials Chemistry B*, 9(9): 2189–2199. <https://doi.org/10.1039/D1TB00141H>

- Mitura, S., Sionkowska, A., & Jaiswal, A. (2020). Biopolymers for hydrogels in cosmetics: review. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 31(6): 1–14. <https://doi.org/10.1007/S10856-020-06390-W>
- Mohan, N., Nair, R. P. A. N., & Narayanasamy, D. (2025). Nanoparticle-integrated transdermal patches: a platform for next-generation drug delivery. *Drug Development Research*, 86(7): 70164. <https://doi.org/10.1002/DDR.70164>
- Montes Belloso, M. E. (2023). Dermocosmética y principales patologías de la piel. Sanidad y Ediciones, S.L.
- Prasetyo, B. E., Mariadi, Permata, Y. M., Laila, L., Victoria, V., Rafiqah, L., & Rahani, D. N. (2025). Fish gelatin and chitosan-based anti-acne patch with tea tree oil: development and evaluation. *International Journal of Applied Pharmaceutics*, 17(3): 237–242. <https://doi.org/10.22159/IJAP.2025V17I3.53714>
- Qothrunnadaa, T., & Hasanah, A. N. (2021). Patches for acne treatment: an update on the formulation and stability test. *International Journal of Applied Pharmaceutics*, 13(4): 21–26. <https://doi.org/10.22159/IJAP.2021.V13S4.43812>
- Saurat, J.-H., Halioua, B., Baissac, C., Perez Cullerell, N., Ben Hayoun, Y. B., Saint Aroman, M., Taieb, C., & Skayem, C. (2024). Epidemiology of acne and rosacea: A worldwide global study. *Journal of American Dermatology*, 90: 1016–1018. <https://doi.org/10.1186/ar4135>
- Tan, J. K. L., & Bhate, K. (2015). A global perspective on the epidemiology of acne. *The British Journal of Dermatology*, 172: 3–12. <https://doi.org/10.1111/BJD.13462>
- Tapfumaneyi, P., Imran, M., Mohammed, Y., & Roberts, M. S. (2022). Recent advances and future prospective of topical and transdermal delivery systems. *Frontiers in Drug Delivery*, 2: 957732. <https://doi.org/10.3389/FDDEV.2022.957732/BIBTEX>
- Thai Tran, B. L., Van Vo, T., Chu, T. P., Bach, D. T., Nguyen, T. Q., Bao Luu, P. H., Thuy Tran, V. T., Duong, H. H., Nguyen, N. H., Le, G. T., Tran, T. T., Tuong Tran, K. N., Cam Tuyen, L. T., Dinh, T. N., Uyen, N. N., Thu Nguyen, T. T., Thi Nguyen, N. Van, Nguyen, K. T., Nhu Tran, L. T., & Le, P. H. (2024). Antibacterial efficacy of low-dosage silver nanoparticle–sodium alginate–chitosan nanocomposite films against pure and clinical acne strains. *RSC Advances*, 14(45): 33267–33280. <https://doi.org/10.1039/D4RA05180G>
- Vaglio, R. F., & Céspedes, N. P. (2020). Acné vulgaris: actualizaciones en fisiopatología y tratamiento. *Revista Ciencia y Salud Integrando Conocimientos*, 4(4): 52-65. <https://doi.org/10.34192/CIENCIAYSALUD.V4I4.174>
- Wong, W. F., Ang, K. P., Sethi, G., & Looi, C. Y. (2023). Recent advancement of medical patch for transdermal drug delivery. *Medicina*, 59(4): 778. <https://doi.org/10.3390/MEDICINA59040778>

- Yakup, A., Aimaier, R., Yuan, B., Chen, B., Cheng, J., Zhao, Y., Peng, Y., Dong, J., & Lu, S. (2023). The burden of skin and subcutaneous diseases: findings from the global burden of disease study 2019. *Frontiers in Public Health*, 11: 1145513. <https://doi.org/10.3389/FPUBH.2023.1145513/BIBTEX>
- Yilmaz, E. G., Ece, E., Erdem, Ö., Eş, I., & Inci, F. (2023). A sustainable solution to skin diseases: ecofriendly transdermal patches. *Pharmaceutics*, 15(2): 579. <https://doi.org/10.3390/PHARMACEUTICS15020579>
- Yu, Y. Q., Yang, X., Wu, X. F., & Fan, Y. Bin. (2021). Enhancing permeation of drug molecules across the skin via delivery in nanocarriers: novel strategies for effective transdermal applications. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9: 646554. <https://doi.org/10.3389/FBIOE.2021.646554>
- Zaid Alkilani, A., Sharaire, Z., Hamed, R., & Basheer, H. A. (2024). Transdermal delivery system of doxycycline-loaded niosomal gels: toward enhancing doxycycline stability. *ACS Omega*, 9(31): 33542–33556. <https://doi.org/10.1021/ACSOMEGA.4C01224>
- Zanganeh, S. M., Tahvildari, K., & Nozari, M. (2023). Preparation and characterization of chitosan-alginate biopolymer loaded by clindamycin phosphate as an effective drug delivery system for the treatment of acne. *Research Square*, 2023: 1-20. <https://doi.org/10.21203/RS.3.RS-3598549/V1>
- Zhang, Y., & Wu, B. M. (2023). Current advances in stimuli-responsive hydrogels as smart drug delivery carriers. *Gels*, 9(10): 838. <https://doi.org/10.3390/GELS9100838>
- Zhu, J., Li, Z., Zou, Y., Lu, G., Ronca, A., D'Amora, U., Liang, J., Fan, Y., Zhang, X., & Sun, Y. (2022). Advanced application of collagen-based biomaterials in tissue repair and restoration. *Journal of Leather Science and Engineering*, 4(1): 1–19. <https://doi.org/10.1186/S42825-022-00102-6>

PEROVSKITAS: UNA ALTERNATIVA PROMETEDORA PARA LA PRÓXIMA GENERACIÓN DE PÁNELES SOLARES

*PEROVSKITES: A PROMISING ALTERNATIVE FOR THE NEXT
GENERATION OF SOLAR PANELS*

ZÚÑIGA AVILÉS, Dalía

MARTÍNEZ LÓPEZ, Miguel

TÉLLEZ LÓPEZ, Antonio

ALCÁNTARA COBOS, Adrián

RESUMEN

La crisis ambiental derivada del calentamiento global, provocado principalmente por el uso intensivo de combustibles fósiles, exige acelerar la transición energética hacia fuentes renovables. Dentro de este abanico, la energía solar fotovoltaica destaca como una de las alternativas más prometedoras, debido a la reducción sostenida de sus costos de producción en las últimas décadas y al avance en el desarrollo de nuevas tecnologías y materiales para la fabricación de células solares. Las células solares de perovskita (CSP) han cobrado gran relevancia, ya que presentan ventajas significativas frente a las elaboradas con materiales convencionales, como el silicio (Si). Una de sus principales fortalezas es la eficiencia de conversión, la cual ha alcanzado valores superiores a 26 % en apenas una década de investigación y desarrollo. Asimismo, las CSP ofrecen menores costos de producción en comparación con las tecnologías comerciales actuales y exhiben una notable flexibilidad composicional, lo que permite ajustar sus propiedades según la aplicación específica. Esta versatilidad posibilita ampliar el rango de absorción de luz solar, modificar el ancho de banda prohibida y facilitar el dopaje químico. No obstante, las CSP aún enfrentan importantes desafíos que limitan su comercialización a gran escala, entre ellos, la sensibilidad a factores ambientales como humedad, oxígeno, temperatura y radiación ultravioleta, que afectan su estabilidad y aceleran su degradación. Adicionalmente, se presentan aspectos relacionados con la sostenibilidad y la toxicidad de los materiales empleados, como el plomo, el cual constituye un problema crítico, ya que este elemento presenta alta toxicidad y representa un riesgo significativo tanto para la salud humana como para el medio ambiente, lo que hace indispensable su sustitución por materiales menos nocivos.

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
21 de octubre de 2025.
Fecha de aceptación
16 de febrero de 2026.

Palabras clave: perovskita; energía; células solares.

ABSTRACT

The environmental crisis resulting from global warming, primarily driven by the intensive use of fossil fuels, requires accelerating the transition of the energy system toward renewable and sustainable sources. Within this range of options, photovoltaic solar energy stands out as one of the most promising alternatives, due both to the sustained decrease in production costs over recent decades and to the development of new technologies and materials used in solar cell manufacturing. In this context, perovskite solar cells (PSC) have gained significant relevance, as they present substantial advantages over cells made from conventional materials such as silicon (Si). One of their main strengths is their high-power conversion efficiency, which has exceeded 26 % within just a decade of research and development. Additionally, PSC potentially offer lower production costs compared with current commercial technologies and exhibit remarkable compositional flexibility, allowing modulation of their physicochemical properties according to specific applications. This versatility enables expansion of the solar spectrum absorption range, adjustment of the bandgap, and facilitation of controlled chemical doping processes. Nevertheless, PSC still face major challenges that limit their large-scale commercialization, including high sensitivity to environmental factors such as humidity, oxygen, temperature, and ultraviolet radiation, which affect their stability and accelerate degradation. Furthermore, challenges related to sustainability and toxicity of some employed materials remain, particularly lead, which constitutes a critical issue because this element is highly toxic and poses risks to both human health and the environment, thereby necessitating the search for and development of alternative materials with lower environmental and health impacts.

Keywords: perovskite; energy; solar cells.

INTRODUCCIÓN

La concentración de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera ha aumentado de manera significativa desde el inicio de la era industrial. Según datos de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), en 1960 la

concentración de CO₂ era de 319 partes por millón (ppm). Para enero de 2025, la NASA registró un récord histórico de 428 ppm, lo que representa un incremento de 35 % en apenas 65 años. El principal problema de este aumento radica en que el CO₂ es un gas de efecto invernadero (GEI) capaz de atrapar el calor y provocar el calentamiento global, contribuyendo de manera significativa al cambio climático (NASA, 2025).

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) estima que la población mundial actual asciende a 8 mil 200 millones de personas y alcanzará su máximo alrededor de 10 mil 300 millones a mediados de la década de 2080. Este crecimiento poblacional implicará una mayor demanda de energía, alimentos y otros recursos. Como consecuencia, se espera que diversas industrias se expandan, que el consumo de combustibles aumente y que la producción de CO₂ se intensifique (ONU, 2024b).

Como parte de su agenda de desarrollo sostenible, las Naciones Unidas han establecido 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de alcance global. Dos de estos objetivos están directamente relacionados con el cambio climático y la generación de energía limpia. El ODS 7 tiene como objetivo garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna, mientras que el ODS 13 busca promover la adopción de medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos. La transición energética hacia las energías renovables (ER) es fundamental para reducir los impactos socioeconómicos y ambientales asociados al consumo de combustibles fósiles, favoreciendo el cumplimiento de los objetivos establecidos por la ONU (ONU, 2024a).

En los últimos años ha aumentado el capital humano y financiero destinado a satisfacer la demanda de energía limpia y asequible mediante las energías renovables. Parte de estos recursos se canaliza hacia la investigación y el desarrollo, con el objetivo de reducir los costos de producción y mejorar la eficiencia energética. Una de las energías renovables que se considera una solución prometedora para mitigar el cambio climático y fortalecer la seguridad energética es la energía solar fotovoltaica. En este campo se han logrado avances significativos, especialmente en el desarrollo de nuevas tecnologías de células solares, orientadas principalmente a incrementar la eficiencia y reducir los costos. Entre estos avances destacan los paneles bifaciales, que absorben radiación por ambas caras; los seguidores solares, que ajustan la orientación del panel; las tejas solares; y las células solares transparentes que pueden integrarse en ventanas, entre otros.



Además de los avances mencionados en la tecnología fotovoltaica (FV) convencional, se han desarrollado tecnologías FV alternativas orientadas a mejorar la eficiencia de la célula, reducir los costos de producción y ampliar las aplicaciones de la energía solar. Estos esfuerzos son fundamentales en la transición hacia las energías renovables, ya que abordan las limitaciones de los sistemas fotovoltaicos tradicionales. Como resultado, se han desarrollado nuevos materiales que permiten la fabricación de sistemas fotovoltaicos más eficientes, entre ellos:

- Células solares de perovskita (CSP)
- Células fotovoltaicas orgánicas (CSFVO)
- Células solares de puntos cuánticos (SPC)
- Células solares sensibilizadas con colorante (CSSC)
- Células solares en tándem (CST)

En comparación con los paneles solares tradicionales basados en silicio, los sistemas fotovoltaicos emergentes ofrecen mayores eficiencias, menores costos de producción y una ampliación significativa de sus aplicaciones, lo que los posiciona como alternativas viables para el desarrollo energético sostenible. Entre estas tecnologías, las células solares de perovskita destacan como una de las propuestas más prometedoras a nivel mundial, por su alta eficiencia de conversión energética, versatilidad y potencial para fabricarse mediante procesos de bajo costo y menor consumo energético. Estas características las convierten en un elemento estratégico para impulsar la transición hacia sistemas energéticos más sostenibles.

METODOLOGÍA

El presente trabajo correspondió a una revisión bibliográfica de tipo sistemática con enfoque cualitativo y documental, orientada al análisis del estado del arte sobre el uso de materiales tipo perovskita en aplicaciones fotovoltaicas. El objetivo general fue identificar, analizar y sintetizar la evidencia científica disponible relacionada con las propiedades estructurales, optoelectrónicas y tecnológicas de los perovskitas, así como su desempeño, estabilidad y potencial de implementación en la fabricación de celdas solares de alta eficiencia.

FUENTES DE INFORMACIÓN

La recopilación de información se llevó a cabo mediante la consulta de bases de datos científicas internacionales indexadas y revisadas por pares, reconocidas por su rigor académico y amplia cobertura en el área de materiales avanzados y energías renovables. Las bases de datos utilizadas fueron ScienceDirect, Scopus, Wiley Online Library, Taylor & Francis Online y Web of Science (WoS). Estas plataformas permitieron acceder a artículos científicos, revisiones especializadas y publicaciones de alto impacto relacionadas con materiales fotovoltaicos basados en perovskitas.

ESTRATEGIA DE BÚSQUEDA BIBLIOGRÁFICA

La búsqueda bibliográfica se realizó mediante el uso de palabras clave relacionadas con el tema de estudio, tanto en idioma inglés como en español, con el propósito de garantizar una cobertura amplia y representativa de la literatura científica. Se emplearon operadores booleanos (AND, OR, NOT) para optimizar la precisión y pertinencia de los resultados obtenidos.

Entre las principales formas de búsqueda utilizadas se incluyeron las siguientes:

- “perovskite solar cells” AND efficiency
- “perovskite photovoltaic materials” AND synthesis
- “stability of perovskite solar cells” OR degradation mechanisms
- “efficiency of perovskite photovoltaics” AND performance optimization
- “celdas solares de perovskita” AND aplicaciones fotovoltaicas
- “materiales fotovoltaicos de perovskita” AND estabilidad

El periodo temporal considerado comprendió publicaciones realizadas en los últimos quince años con el fin de incluir avances recientes y tendencias emergentes en el desarrollo tecnológico de celdas solares basadas en perovskitas.

CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN

Se establecieron criterios específicos para la selección de la literatura científica con el propósito de garantizar la calidad, relevancia y pertinencia de la información recopilada.

Los criterios de inclusión fueron:

- Artículos científicos revisados por pares.
- Publicaciones relacionadas directamente con la síntesis, caracterización, propiedades optoelectrónicas, estabilidad, eficiencia y aplicaciones fotovoltaicas de materiales tipo perovskita.
- Documentos publicados en idioma inglés.
- Estudios experimentales, teóricos y revisiones científicas especializadas.

Los criterios de exclusión incluyeron:

- Estudios duplicados identificados en diferentes bases de datos.
- Publicaciones sin acceso al texto completo.
- Documentos cuyo contenido no abordara aplicaciones fotovoltaicas o que se centraran en usos no relacionados con la conversión de energía solar.

PROCESO DE SELECCIÓN DE LITERATURA

El proceso de selección de la información se realizó mediante un filtrado progresivo basado en la revisión de títulos, resúmenes y textos completos de las publicaciones identificadas. Inicialmente, se efectuó una depuración para eliminar registros duplicados obtenidos en múltiples bases de datos. Posteriormente, se evaluó la pertinencia temática de los estudios mediante la lectura de resúmenes. Finalmente, se llevó a cabo la revisión detallada de los textos completos para seleccionar los trabajos que cumplieran con los criterios establecidos.

EXTRACCIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

La información relevante obtenida de los estudios seleccionados se organizó mediante matrices de análisis estructuradas, en las cuales se registraron variables específicas relacionadas con el desempeño y desarrollo tecnológico de las perovskitas en aplicaciones fotovoltaicas. Entre las variables consideradas se incluyeron el tipo de perovskita, métodos de síntesis, eficiencia de conversión energética, estabilidad operativa, ventajas tecnológicas y limitaciones asociadas.



El análisis de la información se realizó mediante una síntesis comparativa y crítica del contenido, permitiendo identificar similitudes, diferencias, avances tecnológicos y áreas de oportunidad en el desarrollo de celdas solares basadas en perovskitas.

ORGANIZACIÓN Y SÍNTESIS

Los resultados obtenidos fueron organizados y estructurados en función de las principales tendencias tecnológicas reportadas en la literatura científica. La síntesis del conocimiento se desarrolló considerando avances recientes en la mejora de eficiencia, estrategias para el incremento de estabilidad, innovaciones en métodos de síntesis, así como los desafíos tecnológicos y perspectivas futuras para la implementación comercial de dispositivos fotovoltaicos basados en perovskitas. Esta organización permitió construir un análisis integral y actualizado del progreso científico y tecnológico en el área de estudio.

DESARROLLO Y DISCUSIÓN

CÉLULAS SOLARES DE PEROVSKITA (CSP)

La perovskita es un mineral compuesto por óxido de calcio y titanio (CaTiO_3), descubierto en 1839. Este material, abundante en la naturaleza, presenta un amplio potencial de aplicación en áreas como la superconductividad, la magnetorresistencia, la conductividad iónica y diversas propiedades eléctricas, lo que lo convierte en un recurso de gran interés para las industrias de telecomunicaciones y microelectrónica (Chauhan y col., 2024; Rehman y col., 2025; Sahoo y col., 2025).

En los últimos años, la perovskita ha despertado un interés creciente en el campo de la energía fotovoltaica, gracias a sus destacadas propiedades optoelectrónicas y a su capacidad de conversión energética. El término perovskita se emplea, en efecto, para describir una amplia gama de materiales que comparten la misma estructura cristalina del CaTiO_3 . La fórmula general de estos compuestos es ABX_3 , donde A y B son cationes y X es un anión. En aplicaciones fotovoltaicas, los cationes A más comunes son

orgánicos o inorgánicos, como el metilamonio (MA), formamidinio (FA) o cesio (Cs); los cationes B suelen ser metales, principalmente plomo (Pb) o estaño (Sn), mientras que X corresponde a un anión haluro como cloro (Cl), bromo (Br) o yodo (I) (Priya y Stonier, 2025; Sahoo y col., 2025).

En los materiales con estructura de perovskita es posible ajustar propiedades clave para la industria fotovoltaica, entre ellas, las propiedades electrónicas, ópticas y mecánicas, lo que ha permitido que la eficiencia de las células solares de perovskita se incremente significativamente en los últimos años. Además, estas células pueden fabricarse mediante procesos de bajo costo, lo que les otorga un alto potencial para convertirse en una de las principales tecnologías de producción de energía limpia y asequible (Mathan Kumar y col., 2025).

Las células solares de perovskita han despertado un gran interés en la comunidad científica gracias a sus múltiples ventajas, entre ellas: alta eficiencia de conversión energética, derivada de su excelente absorción de luz, banda prohibida directa y alta movilidad de portadores de carga. Estas características permiten aprovechar una mayor fracción del espectro solar para la generación de energía, lo que incrementa notablemente su desempeño fotovoltaico. Además, se distinguen por su versatilidad, potencial reducción del impacto ambiental, procesamiento a bajo costo y su potencial para competir en los mercados de energía renovable (Jose y col., 2025a; Priya y Stonier, 2025; Roy y col., 2020).

El primer uso documentado de un material con estructura de perovskita en una célula solar se remonta a 2009. En este estudio se empleó una célula solar sensibilizada por colorante, con una delgada capa de perovskita depositada sobre óxido de titanio (TiO_2). Esta célula alcanzó una eficiencia de apenas 3.8 %, además de presentar baja estabilidad, atribuida al uso de un electrolito líquido. En 2011, un diseño similar que incorporaba puntos cuánticos como material nanocristalino logró elevar la eficiencia hasta 6.5 %. Posteriormente, en 2013, se alcanzó una eficiencia de 15 % mediante un proceso de deposición en solución en dos etapas (Purabgola y Kandasubramanian, 2021; Sahoo y col., 2025; Waththage y col., 2025).

Gracias a la intensa investigación global, actualmente se han registrado eficiencias cercanas a 25 %. Este avance se logró en poco más de una década, mientras que las tecnologías basadas en silicio requirieron varias décadas de desarrollo para alcanzar valores de eficiencia comparables.



COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURA CRISTALINA

La estructura cristalina más común de las perovskitas es la fase cúbica. En las esquinas de la celda unitaria se encuentra el catión A, en el centro de la celda se ubica el catión B, y el anión X se localiza en el punto medio de cada arista de la celda (Figura 1). En consecuencia, cada catión B queda rodeado por seis aniones X, formando un octaedro de coordinación BX_6 (Sahu y Palei, 2023; Shah y Meyer, 2025; Waththage y col., 2025).

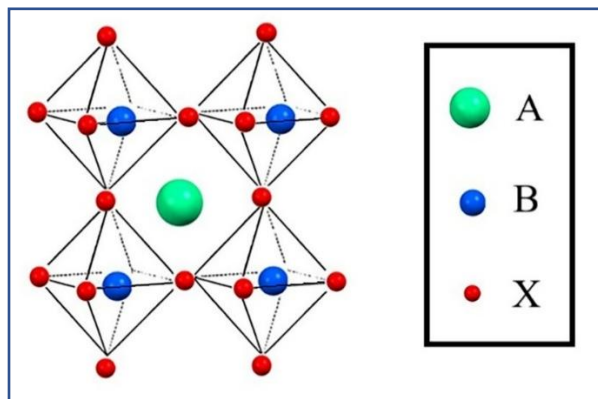


Figura 1. Estructura cristalina típica de perovskita tipo ABX_3 .

La posición del catión A contribuye a compensar la carga y a estabilizar la estructura cristalina. No obstante, con frecuencia se presentan distorsiones en la red cúbica que dan lugar a estructuras ortorrómbicas y tetragonales, lo cual afecta de manera significativa las propiedades mecánicas, ópticas y electrónicas del material (Nande y col., 2021). Actualmente, se han investigado numerosas composiciones de células solares de perovskita; sin embargo, las más estudiadas corresponden a las perovskitas híbridas orgánico-inorgánicas basadas en haluros de plomo, entre las que destacan:

- Yoduro de plomo y metilamonio ($MAPbI_3$), con una composición aproximada de 83-87 % en peso de yoduro de plomo (PbI_2) y de 13-17 % de yoduro de metilamonio (MAI).
- Yoduro de plomo y formamidinio ($FAPbI_3$), compuesto por 60-70 % de PbI_2 y 30-40 % de yoduro de formamidinio (FAI).
- Yoduro de plomo y cesio ($CsPbI_3$), que contiene aproximadamente 30-35 % de yoduro de cesio (CsI) y 50-60 % de PbI_2 .

Además, es común la incorporación de aditivos en concentraciones entre 5 y 20 %, con el objetivo de aumentar la eficiencia de la célula y mejorar la cristalinidad y la estabilidad de la película de perovskita. La fórmula general de estos materiales es APbX_3 , donde:

- A corresponde a un catión que puede ser orgánico, como metilamonio (MA) o formamidinio (FA), o inorgánico, como cesio (Cs).
- Pb representa el catión de plomo.
- X corresponde a un anión haluro, como yodo (I), bromo (Br) o cloro (Cl) (Alam y col., 2025; Roy y col., 2023; Shah y Meyer, 2025).

La Tabla 1 presenta los tipos y características de las células de perovskita híbridas, inorgánicas y de cationes y haluros mixtos.

Tabla 1. Tipos de células de perovskitas (Astakala y col., 2026; Roy y col., 2023; Sambathkumar y Shakila, 2024; Shah y Meyer, 2025).

Perovskitas híbridas orgánico-inorgánicas	Perovskitas totalmente inorgánicas	Perovskitas de cationes y haluros mixtos
Por ejemplo, MAPbI_3 , FAPbI_3 . -Sus propiedades electrónicas y optoelectrónicas son atractivas para uso fotovoltaico. -Tienen altos coeficientes de absorción y movilidades de los portadores de carga.	Por ejemplo, CsPbI_3 y CsPbBr_3 -Mejor estabilidad térmica que perovskitas orgánicas e híbridas -Síntesis compleja. Es difícil obtener perovskitas estables y de alta calidad.	Por ejemplo, (MA, FA) $\text{Pb}(\text{I}, \text{Br})_3$. -Eficiencias mayores. -Mejor estabilidad.

La composición de los materiales de perovskita puede ajustarse en función de la aplicación deseada. Por ejemplo, la sustitución del catión A o del anión X permite modificar propiedades fundamentales de la celda fotovoltaica: la variación del catión A puede alterar la banda prohibida y la estabilidad térmica del material, mientras que la modificación del anión X puede influir en la absorción de luz y en sus propiedades electrónicas. Gracias a esta versatilidad composicional, las células de perovskita poseen un alto potencial en la industria fotovoltaica.



PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LAS CÉLULAS SOLARES DE PEROVSKITA

Las células solares de perovskita han adquirido gran relevancia en el campo de la conversión fotovoltaica debido a sus sobresalientes propiedades electrónicas, ópticas y de transporte de carga, las cuales favorecen altos niveles de eficiencia energética y versatilidad en el diseño de dispositivos fotovoltaicos. Estas características están estrechamente relacionadas con su estructura cristalina y su capacidad de modificación composicional, lo que permite ajustar diversas propiedades funcionales del material.

Desde el punto de vista electrónico, las CSP presentan una estructura de banda prohibida directa, lo que favorece la absorción eficiente de radiación solar y la generación de portadores de carga. Además, la posición del ancho de banda puede modificarse mediante cambios en la composición del material, permitiendo ajustar el rango espectral de absorción. Esta capacidad de ajuste constituye una ventaja significativa para el desarrollo de dispositivos adaptados a aplicaciones específicas (Roy y col., 2020; Shah y Meyer, 2025).

En términos de propiedades ópticas, las CSP destacan por sus altos coeficientes de absorción de luz, particularmente en el rango de 300 a 500 nm, lo que les permite captar grandes fracciones de radiación solar utilizando capas delgadas de material activo. Asimismo, presentan alta probabilidad de recombinación radiativa, lo que se traduce en una fotoluminiscencia eficiente y evidencia la calidad optoelectrónica del material (Roy y col., 2020).

Respecto a las propiedades de transporte, las CSP poseen elevadas movilidades de portadores de carga, típicamente en el rango de 10 a 100 cm^2/Vs , y muestran menor sensibilidad a defectos cristalinos en comparación con semiconductores convencionales. Estas características favorecen una mayor eficiencia en la recolección de carga. Adicionalmente, presentan longitudes de difusión de portadores que varían desde cientos de nanómetros hasta algunos micrómetros, así como una larga vida útil de los portadores de carga, factores que contribuyen a mejorar la extracción de carga y la eficiencia global de conversión energética. La conductividad eléctrica de estos materiales depende de su composición química y de los dopantes incorporados, lo que amplía sus posibilidades de optimización funcional (Roy y col., 2020; Shah y Meyer, 2025).

COMPARACIÓN ENTRE CÉLULAS SOLARES DE PEROVSKITA Y MATERIALES FOTOVOLTAICOS CONVENCIONALES

Las CSP han sido comparadas ampliamente con tecnologías fotovoltaicas tradicionales, como las basadas en silicio, debido a su rápido desarrollo tecnológico y potencial comercial. A continuación, se presentan sus principales ventajas y desventajas (Tabla 2).

Tabla 2. Ventajas y desventajas de las células solares de perovskita frente a materiales fotovoltaicos convencionales (Balagowtham y col., 2025; Jose y col., 2025b; Naseer y col., 2025; Priya y Stonier, 2025; Singh y col., 2025).

Ventajas	
Eficiencia	Las CSP han alcanzado eficiencias de conversión energética superiores a 25 % en menos de 15 años de desarrollo, superando en algunos casos la eficiencia de células solares de silicio comerciales.
Costo y fabricación	Los métodos de producción requieren menor consumo energético y pueden ser más económicos. Además, permiten el uso de técnicas de procesamiento en solución, como recubrimiento por centrifugación, impresión por inyección de tinta y procesamiento rollo a rollo, lo que favorece su escalabilidad industrial.
Propiedades del material y capacidad de ajuste	Presentan alta variabilidad composicional que permite modificar propiedades eléctricas y ópticas. El ancho de banda, el rango de absorción y otros parámetros pueden ajustarse mediante dopaje químico relativamente sencillo, permitiendo el diseño de dispositivos específicos y la absorción de luz en un rango espectral más amplio.
Desventajas	
Estabilidad y durabilidad	Las CSP son altamente sensibles a factores ambientales como humedad, oxígeno, calor y radiación ultravioleta, lo que provoca degradación del material, disminución de eficiencia y menor vida útil en comparación con tecnologías convencionales.
Sostenibilidad y salud	El uso de plomo en muchas composiciones de perovskita representa riesgos ambientales y para la salud. Aunque se han propuesto materiales sustitutos, aún presentan limitaciones para alcanzar eficiencias equivalentes. Además, su disposición final requiere estrategias de reciclaje para mitigar impactos ambientales.

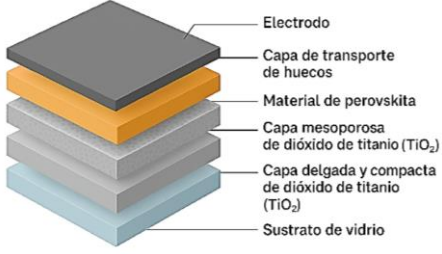
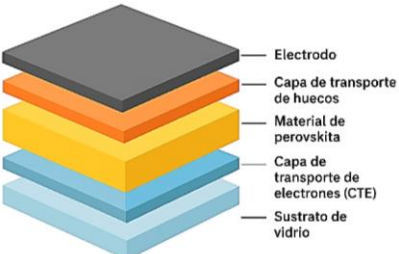
FUNCIONAMIENTO Y ARQUITECTURA DE LAS CÉLULAS SOLARES DE PEROVSKITA.

Una célula fotovoltaica convierte la luz solar en electricidad mediante materiales semiconductores, a través del efecto fotovoltaico. El proceso comienza con la absorción de luz, durante la cual un fotón excita un electrón, desplazándolo de la banda de valencia a la banda de conducción y generando un par electrón-hueco. La siguiente etapa es la separación de cargas, en la que un campo eléctrico induce el desplazamiento y la separación de los electrones y los huecos. Posteriormente, ocurre el transporte de cargas, proceso en el cual los electrones y los huecos se desplazan a través de capas selectivas, generando un voltaje debido a la barrera de potencial interna de la célula, lo que permite la generación de corriente eléctrica en un circuito externo. Finalmente, las cargas son recolectadas en los electrodos (Jose y col., 2025a; Manjunath y col., 2025; Priya y Stonier, 2025).

Actualmente, existen diversos materiales absorbentes de luz empleados en sistemas solares fotovoltaicos, siendo los más comunes el silicio (Si), el telurio de cadmio (CdTe) y el sulfuro de cadmio (CdS). Como resultado de los avances en la ciencia e ingeniería de materiales, se han desarrollado nuevas tecnologías que permiten absorber la luz de manera más eficiente. Entre estas tecnologías emergentes se encuentran las células solares de puntos cuánticos, las células solares sensibilizadas con colorante, las células solares en tándem, las células solares orgánicas y las células solares de perovskita, siendo estas últimas consideradas una de las innovaciones más prometedoras en el campo de la tecnología fotovoltaica (Jose y col., 2025d; Manjunath y col., 2025).

La arquitectura de las células solares de perovskita se clasifica en dos categorías principales: la estructura mesoporosa y la estructura planar. Estas configuraciones permiten alcanzar altos niveles de eficiencia y costos de producción reducidos. Cada tipo de arquitectura cuenta con componentes específicos que influyen directamente en el desempeño de la célula. En la Tabla 3 se presentan las características principales de cada estructura.

Tabla 3. Tipos de arquitectura de células solares de perovskita (Alam y col., 2025; Gantumur y col., 2025; Gopal Krishna y col., 2021; Jose y col., 2025d; Priya y Stonier, 2025; Roy y col., 2020).

Estructura mesoporosa (Figura 2).	Estructura plana (Figura 3).
1. Sustrato de vidrio. 2. Óxido conductor transparente (OCT), generalmente óxido de estaño dopado con flúor (OEF) u óxido de indio y estaño (OIE). 3. Capa delgada y compacta de dióxido de titanio (TiO_2), cuya función es el transporte de electrones y la prevención de la recombinación electrón-hueco. 4. Capa mesoporosa de dióxido de titanio (TiO_2), la cual proporciona una plataforma para la infiltración de la perovskita, aumentando el área interfacial y favoreciendo una separación de carga más eficiente. 5. Material de perovskita, depositado sobre la capa mesoporosa de TiO_2. Durante este proceso, la perovskita se infiltra en la estructura mesoporosa del TiO_2 y forma una película sólida capaz de absorber la luz y generar portadores de carga. 6. Capa de transporte de huecos, que puede estar compuesta por Spiro-OMeTAD o poli(triarylamina) (PTAA), cuya función es la extracción y el transporte de huecos hacia el ánodo. 7. Electrodo, generalmente fabricado de oro o plata, el cual se deposita sobre la capa de transporte de huecos.  Figura 2. Estructura mesoporosa. Esta estructura proporciona altas eficiencias de conversión de potencia debido a la efectiva absorción de luz y al eficiente transporte de carga.	1. Sustrato de vidrio. 2. Óxido conductor transparente (OCT). Generalmente, se emplea óxido de estaño dopado con flúor (OEF) u óxido de indio y estaño (OIE). 3. Capa de transporte de electrones (CTE). Se emplean materiales como TiO_2, SnO_2 o el éster metílico del ácido fenil-C61-butírico (PCBM). 4. Material de perovskita. Este material se deposita directamente sobre la capa de transporte de electrones, sin necesidad de una estructura mesoporosa de soporte. 5. Capa de transporte de huecos. Pueden emplearse materiales como Spiro-OMeTAD, PTAA o materiales inorgánicos como el óxido de níquel (NiO). 6. Electrodo. Generalmente está compuesto por oro o plata y se deposita sobre la capa de transporte de huecos.  Figura 3. Estructura plana. Este tipo de arquitectura presenta un proceso de fabricación más simple y mayor facilidad de escalamiento. Sin embargo, en términos de eficiencia, puede presentar valores ligeramente inferiores en comparación con la estructura mesoporosa, debido a una menor eficiencia en la separación de carga y a mayores tasas de recombinación.

AVANCES RECIENTES Y PERSPECTIVAS FUTURAS EN LA TECNOLOGÍA DE CÉLULAS SOLARES DE PEROVSKITA (CSP)

Los avances más significativos en el desarrollo de las células solares de perovskita (CSP) se han concentrado en la mejora de la eficiencia, el



incremento de la estabilidad operativa, la optimización de nuevas composiciones y el impulso hacia su comercialización e integración en tecnologías emergentes. Desde su introducción en aplicaciones fotovoltaicas en 2009, cuando las perovskitas de haluro organometálico se emplearon en células solares sensibilizadas por colorante con eficiencias de conversión de entre 3 % y 8 %, el progreso ha sido notable. La transición hacia dispositivos de estado sólido, junto con la manipulación química y el perfeccionamiento de los métodos de síntesis, permitió alcanzar eficiencias superiores a 16 % en 2015, superar 20 % en 2016 y, en la actualidad, obtener valores por encima de 25 % (Naseer y col., 2025). Este rápido desarrollo, logrado en menos de 15 años, ha consolidado a las CSP como una alternativa prometedora frente a las tecnologías basadas en silicio.

Uno de los enfoques principales para incrementar la eficiencia consiste en el desarrollo de células solares en configuración tándem, en las que las capas de perovskita se combinan con otros materiales, como el silicio, para aprovechar un espectro solar más amplio. Estas configuraciones permiten optimizar la absorción de la radiación al integrar materiales con diferentes coeficientes de absorción, lo que potencialmente posibilita alcanzar eficiencias superiores a 30 %. No obstante, esta estrategia presenta retos técnicos relevantes, entre los que destacan la optimización de las interfaces, el ajuste de la banda prohibida y la compatibilidad entre los componentes (Jose y col., 2025c; Kumar y col., 2026; Lin y col., 2026). Asimismo, el desarrollo de células multiunión basadas en perovskita requiere el empleo de modelos computacionales, aprendizaje automático, diseño asistido por computadora y métodos experimentales avanzados para optimizar la deposición capa por capa y minimizar las pérdidas interfaciales, incrementando la eficiencia global (Hussain y Gagliardi, 2022; Vengoli y col., 2025).

Paralelamente, la estabilidad y la vida útil de las CSP continúan siendo desafíos fundamentales. Factores ambientales como la humedad, el oxígeno, el calor y la radiación ultravioleta provocan la degradación del material. Para contrarrestar estos efectos, se han desarrollado nuevos métodos de síntesis, composiciones químicas más estables, técnicas avanzadas de encapsulación y ajustes en las capas de interfaz. En este contexto, las perovskitas bidimensionales (2D) han demostrado mayor resistencia frente a condiciones ambientales adversas. Además, se investigan sistemas de encapsulación multicapa que combinan materiales de barrera orgánicos e inorgánicos, así como recubrimientos ultrafinos obtenidos mediante deposición de capas atómicas (ALD) y deposición química de vapor (CVD), que proporcionan

protección adicional y mejoran la estabilidad operativa (Balagowtham y col., 2025; Wu y col., 2025).

Otro aspecto relevante en la evolución de las CSP es la búsqueda de composiciones químicas alternativas que permitan mantener o mejorar las propiedades electrónicas del material, al tiempo que se reduce su impacto ambiental. En particular, el desarrollo de perovskitas sin plomo representa una línea de investigación prioritaria debido a la toxicidad de este elemento y los riesgos asociados para la salud y el medio ambiente. Asimismo, la exploración de nuevas combinaciones de cationes, aniones y haluros ha permitido diseñar perovskitas de haluros mixtos, como las de yoduro-bromuro, que facilitan el ajuste de la banda prohibida y favorecen su aplicación en estructuras tándem. El desarrollo de perovskitas dobles también constituye una alternativa prometedora para reducir la toxicidad y mejorar la eficiencia y estabilidad de los dispositivos (Astakala y col., 2026; Battula y col., 2022; Menon y Krishnamoorthy, 2025; Yadav y col., 2025).

En términos de aplicación tecnológica, los esfuerzos hacia la comercialización han demostrado la viabilidad de las CSP para la fabricación de paneles solares integrados, flexibles y ligeros, ampliando sus posibilidades de uso en dispositivos portátiles, electrónica flexible, fuentes de energía móviles y sistemas integrados en edificaciones, como ventanas fotovoltaicas. Para lograr estas aplicaciones, es necesario optimizar la estabilidad mecánica, la eficiencia energética, la selección de sustratos adecuados, los métodos de encapsulación y la arquitectura del dispositivo (Jose y col., 2025c; Khir y col., 2025; Maniarasu y col., 2025; Salem y col., 2026).

La viabilidad industrial de las CSP depende del desarrollo de técnicas de fabricación escalables y económicamente competitivas. Entre las estrategias más relevantes destacan la impresión por inyección de tinta, la producción rollo a rollo y la deposición de vapor, que permiten reducir costos y tiempos de producción. Además, la implementación de controles de calidad en tiempo real, la automatización de procesos y el establecimiento de normas de calidad son factores esenciales para garantizar la consistencia y uniformidad de las películas de perovskita, favoreciendo su comercialización masiva (Balagowtham y col., 2025; Kumar y col., 2026).

Finalmente, la integración de las CSP con sistemas de almacenamiento de energía constituye una línea de investigación emergente orientada a mitigar la intermitencia inherente a la generación fotovoltaica. En este contexto, se

explora la combinación de células de perovskita con baterías y supercondensadores para asegurar un suministro energético más estable. Paralelamente, se investigan células de perovskita transparentes, estrategias de gestión térmica y sistemas de control inteligente que contribuyan a maximizar la eficiencia energética global (Almutairi y col., 2025). En conjunto, estos avances reflejan el potencial de las CSP para consolidarse como una tecnología clave en el desarrollo de sistemas fotovoltaicos de próxima generación.

CONCLUSIONES

La crisis climática actual, impulsada principalmente por el uso excesivo de combustibles fósiles, exige la implementación de medidas urgentes de mitigación mediante una transición energética hacia fuentes renovables sostenibles. Entre estas, la energía solar fotovoltaica destaca como una de las alternativas más prometedoras. El desarrollo de esta tecnología ha mostrado avances significativos en un periodo relativamente corto, en comparación con otras fuentes de energía renovable.

Uno de los principales enfoques de la investigación reciente se ha centrado en la búsqueda de materiales alternativos al silicio convencional. En este contexto, los materiales basados en perovskitas han surgido como una solución con alto potencial tecnológico. Su versatilidad radica en la posibilidad de sintetizarlos a partir de una amplia variedad de compuestos, lo que permite ajustar su banda prohibida y mejorar su estabilidad térmica. Esta capacidad favorece la ampliación del espectro de absorción de la luz, optimizando las propiedades electrónicas y contribuyendo al incremento significativo de la eficiencia de los dispositivos fotovoltaicos.

Las células solares basadas en perovskita han alcanzado eficiencias destacadas; sin embargo, su comercialización sigue limitada por desafíos tecnológicos, entre ellos la inestabilidad frente a la humedad, al oxígeno, a la radiación UV y al estrés térmico, factores que favorecen su degradación y disminuyen la vida útil de los dispositivos. Asimismo, la toxicidad asociada al uso de plomo plantea preocupaciones ambientales, mientras que la escalabilidad y la reproducibilidad de películas homogéneas continúan

representando obstáculos significativos para la producción industrial. En este sentido, las investigaciones futuras deberán enfocarse en el desarrollo de nuevas composiciones con mayor estabilidad y menor toxicidad, así como en estrategias avanzadas de encapsulamiento y en la optimización de interfaces, junto con el desarrollo de métodos de fabricación compatibles con procesos industriales y la implementación de enfoques sostenibles que fortalezcan la viabilidad tecnológica, ambiental y económica de esta tecnología.

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

- Alam, N., Tulka, T. K. & Hossain, M. M. (2025). Materials, stability, and environmental aspects of perovskite solar cell: A topical review. *E-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 13:101093. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prime.2025.101093>
- Almutairi, M. M., Alalwan, M. H., Algharash, H. K., Aldossary, R. A., Al-Saleem, N. K., Alzahrani, Y. A. & Alkahtani, M. (2025). Hybrid energy platforms: A review of perovskite solar cells coupled with graphene supercapacitors. *Results in Engineering*, 28: 107200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107200>
- Astakala, A. K., Lee, S.-Y., Gautam, J., Thapa, K. B., In, I., Lee, S. J. & Park, S.-J. (2026). Engineering inorganic perovskite solar cells: overcoming efficiency and stability barriers for next-generation photovoltaics. *Advanced Powder Materials*, 5: 100354. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apmate.2025.100354>
- Balogowtham, N., Acchutharaman, K. R., Pandian, M. S., Kumar, M., Chang, J.-H. & Ramasamy, P. (2025). Challenges in commercializing perovskite solar cells with focus on sustainability, stability, and cost efficiency. *Solar Energy*, 301: 113892. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2025.113892>

- Battula, R. K., Ramasamy, E., Bhyrappa, P., Sudakar, C. & Veerappan, G. (2022). Chapter 12 - Oxide free materials for perovskite solar cells. In P. Arunachalam, J. Theerthagiri, A. M. Al-Mayouf, M. Y. Choi & M. Jagannathan (Eds.), *Oxide Free Nanomaterials for Energy Storage and Conversion Applications* (pp. 287–306). Amsterdam: Elsevier, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823936-0.00001-2>
- Chauhan, A. K., Kumar, P. & Sharma, S. N. (2024). Chapter Three - Perovskite solar cells: Past, present, and future. In S. Sundaram, V. Subramaniam, R. P. Raffaele, M. K. Nazeeruddin, A. Morales-Acevedo, M. B. Navarro & A. F. Hepp (Eds.), *Photovoltaics Beyond Silicon* (pp. 113–163). Amsterdam: Elsevier, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90188-8.00015-4>
- Gantumur, M., Shahiduzzaman, Md., Hossain, M. I., Akhtaruzzaman, Md., Nakano, M., Karakawa, M., Nunzi, J. M. & Taima, T. (2025). Revolutionizing light capture: a comprehensive review of back-contact perovskite solar cell architectures. *Materials Today*, 90: 441–465. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matmod.2025.08.017>
- Gopal Krishna, B., Rathore, G. S., Shukla, N. & Tiwari, S. (2021). 18 - Perovskite solar cells: A review of architecture, processing methods, and future prospects. In I. Khan, A. Khan, M. M. A. Khan, S. Khan, F. Verpoort & A. Umar (Eds.), *Hybrid Perovskite Composite Materials* (pp. 375–412). Amsterdam: Woodhead Publishing, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819977-0.00018-4>
- Hussain, K. & Gagliardi, A. (2022). Modelling tandem/multi-junction hybrid perovskite–organic solar cells: A combined drift–diffusion and kinetic Monte Carlo study. *Solar Energy*, 243: 193–202. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.07.033>
- Jose, R., Brown, T. M. & Ling, J. (2025a). Chapter One - Perovskite solar cells: amid the rise of photovoltaic technologies. In R. Jose, T. M. Brown, & J. Ling (Eds.), *Perovskite Solar Cells* (pp. 1–20). Amsterdam: Elsevier, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-19134-3.00006-8>
- Jose, R., Brown, T. M. & Ling, J. (2025b). Chapter Seven - Power and price of perovskite solar cells. In R. Jose, T. M. Brown, & J. Ling (Eds.), *Perovskite Solar Cells* (pp. 125–138). Amsterdam: Elsevier, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-19134-3.00012-3>
- Jose, R., Brown, T. M. & Ling, J. (2025c). Chapter Six - Perovskite solar cell products. In R. Jose, T. M. Brown, & J. Ling (Eds.), *Perovskite Solar Cells* (pp. 99–124). Amsterdam: Elsevier, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-19134-3.00011-1>
- Jose, R., Brown, T. M. & Ling, J. (2025d). Chapter Two - Material systems of perovskite solar cells. In R. Jose, T. M. Brown, & J. Ling (Eds.), *Perovskite Solar Cells* (pp. 21–42). Amsterdam: Elsevier, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-19134-3.00007-X>
- Khair, H., Pandey, A. K., Saidur, R., Ahmad, M. S. & Samykano, M. (2025). Advancements, challenges and future prospects of flexible Pb-free perovskite solar cells. *Journal of*

Power Sources, 656: 238025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.238025>

Kumar, P., Shankar, G., Kumar, A., Najar, A. & Pradhan, B. (2026). Recent progress in all-perovskite tandem solar cells and modules: redefining limits. *Progress in Materials Science*, 156: 101560. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2025.101560>

Lin, W., Cao, Y., Ke, Z., & Hassan, A. (2026). Shape-driven optimization strategy for efficient and stable lead-free all-perovskite tandem solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 295: 113971. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2025.113971>

Maniarasu, S., Manjunath, V., Veerappan, G. & Ramasamy, E. (2025). Chapter 17 - Flexible perovskite solar cells. In A. Thankappan, S. Thomas, & Y. Wang (Eds.), *Perovskite Photovoltaics* (Second Edition) (pp. 511–540). Amsterdam: Academic Press, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-21983-2.00018-5>

Manjunath, V., Krishna, R., Maniarasu, S., Ramasamy, E., Shanmugasundaram, S., & Veerappan, G. (2025). Chapter 4 - Perovskite solar cell architectures. In A. Thankappan, S. Thomas, & Y. Wang (Eds.), *Perovskite Photovoltaics* (Second Edition) (pp. 89–118). Amsterdam: Academic Press, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-21983-2.00004-5>

Mathan Kumar, P., Das, A., Seban, L. & Nair, R. G. (2025). Chapter 15.1 - Fabrication of perovskite solar cells. In A. Thankappan, S. Thomas, & Y. Wang (Eds.), *Perovskite Photovoltaics* (Second Edition) (pp. 413–450). Amsterdam: Academic Press, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-21983-2.00015-X>

Menon, V. S., & Krishnamoorthy, A. (2025). Chapter 15 - Nanoengineering of solution processed metal oxide interfacial layers for perovskite solar cells: impact on device performance and stability. In S. S. Ramamurthy, S. Bhaskar, & N. Reddy (Eds.), *Nano-Engineering at Functional Interfaces for Multi-Disciplinary Applications* (pp. 371–397). Amsterdam: Elsevier, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-21691-6.00016-0>

NASA, Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (2025). Cambio climático. Dióxido de Carbono. [En línea]. Disponible en: <https://ciencia.nasa.gov/cambio-climatico/>

ONU, Organización de las Naciones Unidas (2024a). Desarrollo Sostenible. Objetivos de Desarrollo Sostenible. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>

ONU, Organización de las Naciones Unidas (2024b). La Población Mundial Llegará a Un Máximo de 10.300 Millones En Este Siglo. [En línea]. Disponible en: <https://news.un.org/es/story/2024/07/1531126>

Nande, A., Raut, S. & Dhoble, S. J. (2021). Chapter 9 - Perovskite solar cells. In S. J. Dhoble, N. T. Kalyani, B. Vengadaesvaran, & A. Kariem Arof (Eds.), *Energy Materials* (pp. 249–281). Amsterdam: Elsevier, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823710-6.00002-9>



- Naseer, S., Aamir, M., Akhtar, J. & Khan, M. E. (2025). Chapter 8 - Developing high efficiency perovskite solar cells through defect engineering. In A. Thankappan, S. Thomas, & Y. Wang (Eds.), *Perovskite Photovoltaics* (Second Edition) (pp. 227–250). Amsterdam: Academic Press, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-21983-2.00008-2>
- Priya, P. & Stonier, A. A. (2025). Emerging innovations in solar photovoltaic (PV) technologies: The perovskite solar cells and more. *Energy Reports*, 14: 216–242. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2025.06.003>
- Purabgola, A. & Kandasubramanian, B. (2021). 3 - Thin films for planar solar cells of organic-inorganic perovskite composites. In I. Khan, A. Khan, M. M. A. Khan, S. Khan, F. Verpoort, & A. Umar (Eds.), *Hybrid Perovskite Composite Materials* (pp. 95–115). Amsterdam: Woodhead Publishing, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819977-0.00003-2>
- Rehman, Q., Aamir, M., Akhtar, J., Wali, Q. & Khan, A. D. (2025). Chapter 11 - Development of single crystal perovskite solar cells. In A. Thankappan, S. Thomas & Y. Wang (Eds.), *Perovskite Photovoltaics* (Second Edition) (pp. 301–325). Amsterdam: Academic Press, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-21983-2.00011-2>
- Roy, P., Kumar Sinha, N., Tiwari, S. & Khare, A. (2020). A review on perovskite solar cells: Evolution of architecture, fabrication techniques, commercialization issues and status. *Solar Energy*, 198: 665–688. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.01.080>
- Roy, P., Yadav, N. & Khare, A. (2023). 25 - Development of less toxic perovskite materials for solar cell applications. In S. Moharana, T. Badapanda, S. K. Satpathy, R. N. Mahaling, & R. Kumar (Eds.), *Perovskite Metal Oxides* (pp. 645–669). Amsterdam: Elsevier, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99529-0.00012-6>
- Sahoo, S. K., Balamurugan, M. & Narendiran, S. (2025). Chapter 1 - Introduction: why perovskite and perovskite solar cells? In A. Thankappan, S. Thomas, & Y. Wang (Eds.), *Perovskite Photovoltaics* (Second Edition) (pp. 1–24). Amsterdam: Academic Press, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-21983-2.00001-X>
- Sahu, P. & Palei, S. (2023). 19 - Application of perovskites in solar cells. In S. Moharana, T. Badapanda, S. K. Satpathy, R. N. Mahaling, & R. Kumar (Eds.), *Perovskite Metal Oxides* (pp. 485–517). Amsterdam: Elsevier, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99529-0.00025-4>
- Salem, M. S., Shaker, A., Al-Dhlan, K. A., Alshammari, M. T., Qureshi, M. T., Abouelatta, M. & Okil, M. (2026). Design of fully flexible monolithic lead-free perovskite/Si tandem solar cells: Advanced TCAD simulations. *Renewable Energy*, 256: 124522. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.124522>
- Sambathkumar, S. & Shakila, P. B. (2024). Chapter Six - Organic hole-transporting materials for perovskite solar cells: Progress and prospects. In S. Sundaram, V. Subramaniam, R. P. Raffaele, M. K. Nazeeruddin, A. Morales-Acevedo, M. B. Navarro, & A. F. Hepp

(Eds.), *Photovoltaics Beyond Silicon* (pp. 195–220). Amsterdam: Elsevier, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90188-8.00005-1>

Shah, A. U. I. & Meyer, E. L. (2025). Perovskite-based solar cells in photovoltaics for commercial scalability: Current progress, challenges, mitigations and future prospectus. *Solar Energy*, 286: 113172. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.113172>

Singh, A., Challa, R. K., Suhail, A. & Raavi, S. S. K. (2025). Chapter 12 - Advanced optical characterization techniques for perovskite solar cells. In A. Thankappan, S. Thomas, & Y. Wang (Eds.), *Perovskite Photovoltaics (Second Edition)* (pp. 327–357). Amsterdam: Academic Press, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-21983-2.00012-4>

Vengoli, M. N., Muhammed Swalihu, P. M. & Thankappan, A. (2025). Chapter 14 - Mathematical modeling of perovskite solar cells. In A. Thankappan, S. Thomas, & Y. Wang (Eds.), *Perovskite Photovoltaics (Second Edition)* (pp. 383–411). Amsterdam: Academic Press, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-21983-2.00014-8>

Wattthage, S. C., Song, Z., Phillips, A. B. & Heben, M. J. (2025). Chapter 3.1 - Evolution of perovskite solar cells. In A. Thankappan, S. Thomas, & Y. Wang (Eds.), *Perovskite Photovoltaics (Second Edition)* (pp. 43–67). Amsterdam: Academic Press, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-21983-2.00003-3>

Wu, F., Gao, Y., Zeng, Y., Tan, J., Zhong, C., Gao, X., Yang, Y., Liu, Y. & Zhu, L. (2025). Quasi-pure-phase 2D perovskites for high-efficiency and stable 2D/3D perovskite heterojunction solar cells. *Chemical Engineering Journal*, 523: 168799. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.168799>

Yadav, A., Ghafel Shakier, H., Fahdil, F., Sulaiman, J. M. A. & Tariq, H. (2025). 17 - A comparative study on nickel oxide-based hole transport materials for inverted perovskite solar cells. In A. Kumar, P. Kumar, V. Gambhir, & R. C. Kuhad (Eds.), *Advances in Sustainable Materials* (pp. 349–362). Amsterdam: Elsevier, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13849-2.00017-X>

METALURGIA DE LAS UNIONES DISÍMILES ENTRE ACEROS INOXIDABLES

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

METALLURGY OF DISSIMILAR JOINTS BETWEEN STAINLESS STEELS

SÁENZ GALINDO, Rocío

GARCÍA RENTERÍA, Marco

CRUZ HERNÁNDEZ, Ventura Lilia

RESUMEN

La unión soldada de aceros inoxidable disímiles (austeníticos, ferríticos y martensíticos) es una práctica esencial en industrias avanzadas (aeroespacial, energética y química) que demandan componentes con propiedades personalizadas. El principal reto metalúrgico en estas uniones es la formación de estructuras frágiles, como fases indeseables (sigma y chi) y carburos, la distribución desequilibrada de elementos y el desarrollo de tensiones internas. La literatura revisada detalla que la integridad de la soldadura se compromete por las diferencias en el coeficiente de dilatación, la conducción de calor, y la composición química de los materiales. La clave para el éxito reside en una gestión estricta de las variables operativas y la elección del metal de aporte. A partir del análisis de estudios se evalúan técnicas de soldadura idóneas, destacan los procesos de baja entrada de calor como TIG (GTAW soldadura por arco de tungsteno con gas), FSW (fricción-agitación) y láser, que ayudan a mitigar los problemas de microestructura. Además, se ha documentado ampliamente que el diagrama de Schaeffler es una herramienta predictiva fundamental para estimar las fases (austenita, ferrita, martensita) que resultarán de la mezcla de metales. La evidencia indica que, al controlar la dilución y emplear aleaciones de relleno sobrealeadas (como ER309 o ERNiCr-3), se busca prevenir la aparición de estructuras quebradizas, garantizando la resistencia mecánica y la vida útil de la junta.

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

Palabras clave: unión; austenítico; dúplex; oxidación; dilución.

ABSTRACT

The welded joining of dissimilar stainless steels (austenitic, ferritic, and martensitic) is an essential practice in advanced industries (aerospace, energy,

Correspondencia:

rsaenz@uadec.edu.mx

<https://orcid.org/0009-0007-0189-0470>

Fecha de recepción

13 de noviembre de 2025.

Fecha de aceptación

13 de mayo de 2026.

and chemical) that demand components with customized properties. The main metallurgical challenge in these joints is the formation of brittle structures, such as undesirable phases (sigma and chi) and carbides, the unbalanced distribution of elements, and the development of internal stresses. The reviewed literature details that weld integrity is compromised by differences in thermal expansion coefficient, heat conduction, and chemical composition of the materials. The key to success lies in strict management of operational variables and the choice of filler metal. Based on the analysis of studies, suitable welding techniques are evaluated, highlighting low heat input processes such as TIG (GTAW, gas tungsten arc welding), FSW (friction stir welding), and laser, which help mitigate microstructural problems. Furthermore, it has been widely documented that the Schaeffler Diagram is a fundamental predictive tool for estimating the phases (austenite, ferrite, martensite) that will result from the mixture of metals. In essence, the collected evidence indicates that by controlling dilution and using over-alloyed filler alloys (such as ER309 or ERNiCr-3), the aim is to prevent the appearance of brittle structures, ensuring the mechanical strength and service life of the joint.

Keywords: joint; austenitic; duplex; oxidation; dilution.

INTRODUCCIÓN

La unión de aceros inoxidables es un componente fundamental en la manufactura de componentes para industrias como la aeroespacial, petroquímica y de generación energética, donde se exigen propiedades mecánicas y alta resistencia a la corrosión incluso en condiciones de temperatura extrema (Lippold y Kotecki, 2005). El incremento en la complejidad de los diseños de ingeniería ha impulsado la integración de diversas variedades de acero inoxidable dentro de un mismo conjunto, con el objetivo de optimizar el funcionamiento y la eficiencia económica. Esto ha incrementado la práctica de conectar aleaciones disímiles, como la unión entre aceros ferríticos y martensíticos que combina lo mejor de ambos materiales, dando como resultado rendimiento superior en condiciones extremas de temperatura y entornos corrosivos. El beneficio principal reside en la posibilidad de fusionar atributos complementarios en un solo elemento. Un ejemplo de esto es la combinación entre la excelente tenacidad y

resistencia a la oxidación de un acero austenítico junto con la elevada dureza y resistencia al desgaste de un acero martensítico. El principal desafío en la unión de estos materiales surge de sus diferencias fundamentales en composición química, microestructura y comportamiento térmico, factores que generan dificultades significativas durante los procesos de soldadura (Kumar y Singh, 2021). Estas diferencias promueven la formación de compuestos intermetálicos de alta rigidez y fragilidad, los cuales actúan como concentradores de tensiones. Precisamente en estas zonas se originan las grietas que, al difundirse, reducen la capacidad de carga de la junta soldada. En consecuencia, la junta soldada muestra mayor susceptibilidad al fallo por fatiga y una clara tendencia a la fractura (Singh y col., 2023).

Como resultado de las transformaciones microestructurales inducidas por el ciclo térmico de la soldadura (crecimiento de grano en la Zona Afectada por el Calor (ZAC) y la precipitación de carburos y nitruros de cromo en los límites de grano), se produce una degradación notable de las propiedades mecánicas de la unión (Kumar y col., 2022). Estos fenómenos resultan en un incremento significativo de la fragilidad y una mayor susceptibilidad al agrietamiento por fatiga, debido a la combinación de una microestructura endurecida, tensiones residuales y una menor capacidad de deformación. Adicionalmente, la microestructura resultante muestra una mayor predisposición a mecanismos de deterioro específicos.

El comportamiento de estos aceros durante su unión es esencial para garantizar que los productos terminados sean confiables y posean una extensa vida útil (Kumar y col., 2022; Singh y col., 2023). Esta necesidad se deriva de las propiedades intrínsecas de cada familia de acero, las cuales están determinadas por su composición microestructural. Por ejemplo, un acero martensítico posee una dureza extrema, pero está expuesto a las fracturas frágiles, mientras que uno ferrítico es más dúctil y menos resistente (Kumar y col., 2022). En contraste, el acero austenítico proporciona una combinación muy apreciada: gran fortaleza, capacidad para deformarse sin romperse y una excelente resiliencia (Singh y col., 2023). La soldadura disímil debe, por tanto, reconciliar estas diferencias fundamentales para evitar la formación de fases frágiles y concentraciones de tensión que comprometan la integridad de la junta. El objetivo de la presente revisión bibliográfica es analizar los principales desafíos metalúrgicos, las técnicas de soldadura más adecuadas, la selección del metal de aporte y el uso del Diagrama de Schaeffler como herramienta predictiva para la unión de aceros inoxidables disímiles.



(austeníticos, ferríticos y martensíticos), a fin de garantizar la integridad mecánica y la resistencia a la corrosión de las juntas soldadas.

METODOLOGÍA

La presente revisión bibliográfica se desarrolló mediante una búsqueda de literatura científica en bases de datos especializadas. Se consideraron artículos publicados, enfocados en la soldadura de aceros inoxidable disímiles (austeníticos, ferríticos y martensíticos), considerando principalmente los mecanismos de formación de fases, los métodos de unión y los cambios microestructurales.

Se seleccionaron estudios originales y revisiones arbitradas que analizan la influencia del metal de aporte (ER308, ER316, ER309, aleaciones base níquel), los parámetros de soldadura (aporte térmico, velocidad de enfriamiento) y las técnicas de unión (GTAW, GMAW, FSW, láser) sobre la microestructura resultante y las propiedades finales de la unión. Asimismo, se incluyeron investigaciones relacionadas con el uso del diagrama de Schaeffler como herramienta predictiva de fases.

La información recopilada fue analizada de manera crítica y comparativa, permitiendo identificar tendencias actuales, avances relevantes, limitaciones asociadas a la formación de fases frágiles (σ , χ) y carburos, así como cambios microestructurales que afectan la integridad mecánica y la resistencia a la corrosión de las uniones soldadas entre aceros inoxidable disímiles.

DESARROLLO Y DISCUSIÓN

ACEROS INOXIDABLES (AI)

Los AI son aleaciones que se distinguen por su excelente resistencia a la corrosión y la oxidación, lo que los convierte en materiales clave en múltiples aplicaciones industriales. Según la clasificación establecida en el *Welding*

Handbook de la American Welding Society (2011) y el AWS D1.6/D1.6M:2017 *Structural Welding Code: Stainless Steel*, estos aceros se dividen en cinco grupos principales, como se muestra en la Tabla 1 aceros martensíticos, ferríticos, austeníticos, dúplex, y endurecidos por precipitación. Cada uno de caracteriza por una composición química específica y una estructura metalográfica particular.

Tabla 1. Clasificación de aceros inoxidables. Elaborado en base a *American Welding Society* (2011).

Tipo	Elementos predominantes	Características principales
Martensíticos	Hierro, cromo (12–18%), bajo níquel, carbono elevado	Alta dureza y resistencia mecánica
Ferríticos	Cromo elevado (12–30%), bajo carbono	Buena resistencia a la oxidación y estabilidad térmica; menor ductilidad
Austeníticos	Cromo (16–26%), níquel (8–35%), posibles Mo y N	Excelente resistencia a la corrosión; alta ductilidad y facilidad para soldar
Dúplex	Cromo (20–30%), níquel (5–10%), molibdeno	Mezcla de ferrita y austenita; gran resistencia mecánica
Endurecibles por precipitación	Níquel, cobre, aluminio, titanio	Alta resistencia mecánica y buena resistencia a la corrosión

TÉCNICAS DE SOLDADURA PARA UNIONES DISÍMILES DE ACERO INOXIDALBE

La selección adecuada del método de soldadura resulta determinante para obtener uniones estructuralmente resistentes y con una capacidad superior anticorrosiva en aceros inoxidables (Cary y Helzer, 2005). En procesos que demandan un alto nivel de precisión y control del calor, sobre todo en tareas de gran complejidad, la técnica de soldadura TIG (GTAW) se considera la más adecuada. Este procedimiento produce un arco eléctrico muy estable y ofrece una excelente protección del baño de fusión frente a la contaminación del aire, lo que permite conseguir uniones con una superficie de gran calidad y una penetración homogénea. Aprovechando estas ventajas, se utiliza principalmente en materiales de espesores delgados y medios (Cary y Helzer, 2005). En trabajos que requieren unir piezas de gran espesor o realizar



soldaduras de largo recorrido, donde la eficiencia productiva es esencial, el proceso TIG (GTAW) se presenta como una alternativa rentable y técnicamente favorable. No obstante, tal como menciona la *American Welding Society* (2011), para garantizar la integridad de la junta, es indispensable una calibración meticulosa de los parámetros de soldadura, con el fin de suprimir la formación de defectos en particular la porosidad.

En la Tabla 2 se presentan los diferentes procesos de soldadura para aceros inoxidables, elaborada con base en la *American Welding Society* (2011) y el estándar AWS D1.6.

Tabla 2. Procesos de soldadura para aceros inoxidables. Elaborada con base en *American Welding Society* (2011) y AWS D1.6.

Soldadura por arco	Aplicación
GTAW (gas tungsteno arc welding)	Uniones de alta calidad en tuberías, equipos químicos, alimenticios y nucleares.
GMAW (gas metal arc welding)	Estructuras marinas, fabricación de tanques y automotriz
FCAW (flux cored arc welding)	Construcción naval, plataformas y estructuras pesadas
SMAW (Shielded Metal Arc Welding) Electrodo Revestido	Mantenimiento y reparaciones y sitios de difícil acceso
SAW (Submerged Arc Welding)	Uniones longitudinales en tuberías de gran diámetro y placas gruesas

METAL DE APORTE

Los metales de aporte utilizados en soldadura son consumibles; estos se pueden presentar como alambres, varillas o electrodos que se funden durante el proceso para unir de manera firme dos metales base. En el caso de uniones entre materiales disímiles, la selección del metal de aporte es crucial, ya que permite equilibrar las diferencias en composición química, comportamiento térmico y estructura cristalina entre los componentes a unir (Kumar y Singh, 2021; Sireesha y col., 2021). Es común optar por metales de aporte con alto contenido de cromo, lo cual ayuda a equilibrar los efectos de la disolución con el metal base y a conservar una microestructura adecuada. Por ejemplo, en la soldadura del acero inoxidable tipo 304, se emplea habitualmente el electrodo ER308. Sin embargo, cuando se trata de uniones disímiles o existe riesgo de corrosión intergranular, se recomiendan opciones como el ER 316, que ofrece bajo contenido de carbono, o el ER 309, conocido por su elevada proporción de cromo y níquel (Lippold y Kotecki, 2005). Los metales de aporte



desempeñan una función principal en la prevención de la precipitación de fases intermetálicas de naturaleza frágil y en la mitigación de zonas localizadas con empobrecimiento de cromo, las cuales presentan alta susceptibilidad a procesos corrosivos (Kumar y Singh, 2021; Sireesha y col., 2021). En contextos que demandan elevada tenacidad o en la unión de materiales metálicos disímiles, las aleaciones base níquel, como el ERNiCr-3, emergen como la alternativa adecuada. Su principal ventaja es su capacidad para tolerar altos niveles de dilución con los metales base, sin inducir la formación de fases frágiles en la zona de unión (Cary y Helzer, 2005).

DIAGRAMA DE SCHAEFFLER

El diagrama ilustrado en la Figura 1 fue concebido en los años cuarenta como una herramienta gráfica destinada a estimar la microestructura resultante en zonas de unión de aceros inoxidable y aceros disímiles. Su utilidad radica en la capacidad de anticipar la proporción de fases como ferrita y austenita en función de la composición química de los metales base. A pesar de su antigüedad, estudios recientes han confirmado su vigencia y precisión en contextos de manufactura avanzada (Rimpl y col., 2025). Para aplicar el diagrama en el análisis de uniones soldadas es necesario calcular previamente los valores equivalentes de cromo y níquel, tanto del metal base como del metal de aporte. Estas cuantificaciones permiten estimar la proporción de fases metalográficas que se desarrollarán tras la solidificación. Los cálculos se realizan mediante fórmulas prácticas que integran los principales elementos de aleación presentes en la composición química (Lozano y col., 2007).

El cromo equivalente considera elementos formadores de ferrita (Cr, Mo, Si, Nb)

Cromo equivalente = $\%Cr + \%Mo + 1.5 \times \%Si + 0.5 \times \%Nb$

El níquel equivalente incluye elementos formadores de austenita (Ni, C, Mn)



Níquel equivalente = $\% \text{Ni} + 30 \times \% \text{C} + 0.5 \times \% \text{Mn}$

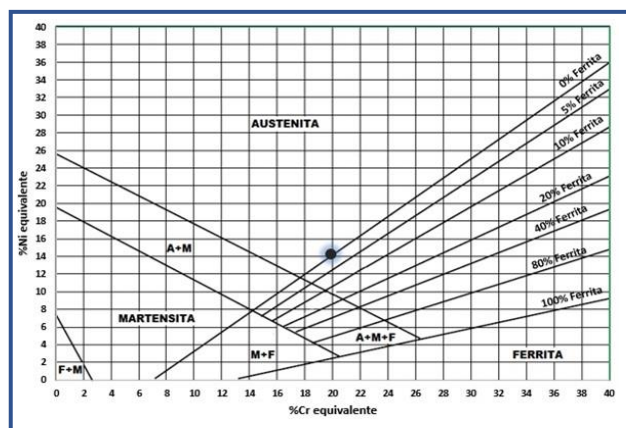


Figura 1. Diagrama de Schaeffler para la predicción de fases. (tomado de Zhang y col., 2020).

La microestructura resultante de una soldadura se determina al posicionar los valores equivalentes de cromo y níquel (Creq y Nieq) en el diagrama correspondiente, el cual clasifica las distintas fases metalúrgicas como austenita, ferrita y martensita en zonas definidas, junto con sus posibles mezclas, según lo señalado por Rimpl y col. (2025).

REGIONES MICROESTRUCTURALES EN UNA SOLDADURA DISIMILAR

La microestructura resultante de una soldadura disimilar no es homogénea, sino que se compone de diversas zonas microestructurales bien definidas, cada una de las cuales presenta características particulares.

Metal Base (MB) son los componentes iniciales que se busca unir. Sus cualidades, como la resistencia y la tenacidad, actúan como un punto de referencia para medir cómo el proceso de soldadura.

Zona Afectada por el Calor (ZAC) es la región del metal base que no se funde, pero cuyas microestructuras y propiedades mecánicas se alteran debido al ciclo térmico de la soldadura. En uniones disímiles, la ZAC en cada lado de la unión es diferente (Mvola y Kah, 2017).

Zona de Fusión (ZF) es donde el metal de aporte y una porción de los metales base se funden y solidifican. En soldaduras disimilares, esta zona no es homogénea y puede subdividirse en:



Zona de No Mezcla (ZNM) o Línea de Unión: es una delgada línea que marca el límite entre el metal base que no se fundió y la zona de fusión. Es una región de solidificación epitaxial donde el metal fundido se solidifica usando el sustrato sólido como plantilla. En uniones disímiles, esta línea puede ser el sitio preferente para la formación de fases Intermetálicas frágiles y segregación de elementos, actuando como un concentrador de tensiones y un camino preferente para la fractura (Haghdadi y col., 2021).

Zona de Mezcla (ZM): es el volumen central de la ZF donde los metales base fundidos y el metal de aporte se mezclan en distintas proporciones. La composición química en esta zona no es uniforme, lo que conduce a variaciones microestructurales locales. Dependiendo de la solubilidad mutua de los elementos, aquí pueden formarse fases intermetálicas, compuestos no deseados y estructuras de grano columnares o equiaxiales. La naturaleza de la ZM está dictada por la química de los materiales y la dinámica fluida del baño de fusión (Kou, 2003).

En la Figura 2 se ilustran esquemáticamente estas zonas (Metal Base, Zona Afectada por el Calor y Zona de Fusión) en una soldadura de aceros disímiles, mostrando la Zona de Mezcla y la Línea de Unión.

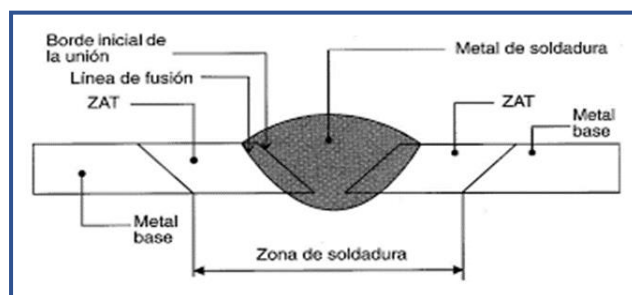


Figura 2. Zonas de la soldadura (Técnica Central, 2014).

Diversas investigaciones han establecido que la microestructura resultante de la soldadura de aceros inoxidables de distinta naturaleza está determinada principalmente por tres factores críticos: la composición química de los metales base, la naturaleza del material de aporte y las condiciones térmicas del proceso de soldadura. En este contexto, la dilución (definida como la interacción y mezcla entre los metales base y el material de relleno) ejerce un control directo sobre la composición química final del cordón, lo cual influye decisivamente en la estabilidad de las fases formadas y en la resistencia a la corrosión del conjunto soldado (Ramírez y Brandi, 2014). La unión de aceros austeníticos con ferríticos presenta desafíos microestructurales significativos, como la formación de regiones con fusión incompleta en la interfaz (Padhy y

col., 2015). Cuando se incorporan aceros martensíticos, las altas velocidades de enfriamiento típicas de estos procesos favorecen la formación de martensita sin revenir en la zona afectada por el calor (ZAC), incrementando notablemente la dureza, pero comprometiendo la tenacidad de la unión (Kou, 2003). En este escenario, el diagrama de Schaeffler y otros similares han demostrado ser herramientas eficaces para predecir con razonable precisión las fases resultantes. Técnicas de soldadura con menor aporte térmico, como GTAW pulsado y la soldadura por fricción-agitación (FSW), han mostrado mayor eficacia para controlar el tamaño de grano y reducir la extensión de la ZAC, mejorando así las propiedades mecánicas y la integridad de la unión (Mishra y Ma, 2023). La utilización de uniones disímiles responde a necesidades industriales concretas como la creación de zonas de transición con propiedades graduales, el reemplazo de componentes en equipos existentes, la reparación de piezas con materiales de mayor rendimiento, y la mejora localizada de propiedades en estructuras sometidas a condiciones de servicio diferenciadas. Estas aplicaciones justifican los esfuerzos por comprender y dominar los fenómenos microestructurales involucrados, con el fin de garantizar la integridad y durabilidad de las uniones en servicio

CONCLUSIONES

TENDENCIAS A FUTURO

La unión de aceros inoxidable disímiles es primordial en aplicaciones de ingeniería avanzada. Garantizar su integridad exige un control meticuloso de los fenómenos metalúrgicos derivados de la combinación de microestructuras y composiciones químicas distintas.

El principal factor que limita el rendimiento de la junta es la formación de fases frágiles, como carburos y las fases sigma y chi, tanto en la unión de soldadura y en la Zona Afectada por el Calor (ZAC). Estas fases no solo comprometen la tenacidad, sino que reducen significativamente la resistencia a la corrosión.

El proceso de soldadura seleccionada influye decisivamente en la microestructura final. Procesos con bajo aporte térmico y alta precisión, como



GTAW (TIG), FSW y los métodos por haz de energía (Láser, Haz de Electrones), han demostrado una superior capacidad para limitar el crecimiento de la ZAC y refinar la microestructura, en comparación con métodos convencionales de alta productividad.

La elección del metal de aporte se erige como una estrategia clave para el éxito. El uso de consumibles sobrealeados (por ejemplo, ER309 o aleaciones base níquel como ERNiCr-3) permite compensar la dilución, inhibir la precipitación de fases indeseables y preservar la composición química necesaria para una resistencia a la corrosión óptima

El diagrama de Schaeffler mantiene su vigencia como una herramienta predictiva esencial en la metalurgia de la soldadura. Su utilidad para estimar las fases de equilibrio y orientar la selección del material de relleno sigue siendo ampliamente reconocida, aunque su aplicabilidad está sujeta a límites específicos en la composición de los aceros.

Como tendencia futura, se vislumbra el desarrollo de metales de aporte más especializados y la optimización de procesos híbridos y automatizados, que permitan un control aún más preciso de la microestructura y las propiedades mecánicas en uniones cada vez más complejas y críticas.

REFERENCIAS

- American Welding Society. (2011). *Welding handbook, Volume 4: Materials and Applications, Part 1* (9th ed.). Miami: American Welding Society. 760p.
- American Welding Society. (2017). *AWS D1.6/D1.6M:2017 - Structural Welding Code: Stainless Steel*. [Lugar no proporcionado]: American Welding Society. 346 p.
- Cary, H. B. & Helzer, S. C. (2005). *Modern welding technology*. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall. 715 p.
- Haghdadi, N., Laleh, M., Abbaszadeh, M. & Chen, Y. (2021). An overview of the interfacial phenomena in dissimilar metal welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 68: 1-22.
- Kou, S. (2003). *Welding metallurgy* (2nd ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. 477 p.



- Kumar, A., Sharma, V. & Patel, R. (2022). Dissimilar joining of different grades of ferritic stainless steel: A review. *Materials Today: Proceedings*, 60(Part 3): 1450-1457.
- Kumar, R. & Singh, K. (2021). Selection of filler metals for dissimilar welding between stainless steel and carbon steel: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 64: 292–308.
- Lippold, J. C. & Kotecki, D. J. (2005). *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. xvi, 357 p.
- Lozano, J., Moreda, P., Llorente, C. L. & Bilmes, P. D. (2007). Soldabilidad en aceros inoxidables y aceros disímiles. *Scientia et Technica*, XIII(34): 273-278.
- Mishra, R. S. & Ma, Z. Y. (2023). Friction stir welding of dissimilar materials: From aerospace applications to microstructural control. *Progress in Materials Science*, 138: 101085.
- Mvola, B. & Kah, P. (2017). Dissimilar ferrous metal welding using advanced gas metal arc welding processes. *Reviews on Advanced Materials Science*, 51(2): 127-154.
- Padhy, G. K., Wu, Y. & Ningshen, S. (2015). Corrosion behavior of dissimilar weldments between austenitic stainless steel and low alloy steel. *Journal of Materials Science & Technology*, 31(9): 933–945.
- Ramirez, A. J. & Brandi, S. D. (2014). A review on the welding metallurgy of dissimilar stainless steels. *Science and Technology of Welding and Joining*, 19(2): 95–111.
- Rimpl, R., Hoefer, K., Haelsig, A., Hensel, J. & Kieback, B. (2025). Application of the Schaeffler diagram to functionally graded structures of 42CrMo4 and Alloy 625 produced by DED-Arc. *Journal of Materials Engineering and Performance*. pp. 1–11
- Singh, A., Kumar, R. & Yamazaki, M. (2023). Dissimilar welding of austenitic and martensitic stainless steel joints for nuclear applications: A review. *Journal of Nuclear Materials*, 585: 154–165.
- Sireesha, M., Shankar, V., Albert, S. K. & Sundaresan, S. (2021). A comparative evaluation of welding consumables for dissimilar weld joints between nuclear grade austenitic stainless steel and modified 9Cr–1Mo steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 288: 116876.
- Técnica Central. (2014, 16 de junio). “Soldabilidad”. Procesos Metalúrgicos Técnica Central. [En línea]. Disponible en: [<http://procesosmetalurgicostecnicocentral.blogspot.com/-2014/06/soldabilidad.html>]
- Zhang, Y., Zhang, S., Huang, Y., Dong, C. & Li, X. (2020). Corrosion behavior of dissimilar welded joints between 316L stainless steel and Inconel 625 in supercritical water environment. *Journal of Materials Science & Technology*, 52: 100–110.

GELES METAL-ORGÁNICOS: HACIA NUEVOS MATERIALES MULTIFUNCIONALES

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

METAL-ORGANIC GELS: TOWARDS NEW
MULTIFUNCTIONAL MATERIALS

JARAMILLO GARCÍA, JONATHAN ¹

MORALES LUCKIE, Raul Alberto ¹

SÁNCHEZ MENDIETA, Víctor ¹

TÉLLEZ LÓPEZ, Antonio ^{1,2}

RESUMEN

Con el creciente interés en la búsqueda de nuevos materiales avanzados que muestren una amplia variedad de aplicaciones, han surgido investigaciones sobre geles metal-orgánicos (GMO). Esto debido a su estructura porosa, gran área superficial específica y la forma en que se pueden modificar o modular para exhibir estructuras porosas. Existen distintas estrategias para la incorporación de metales en geles supramoleculares, basando sus diseños en organogeladores, incluyendo la incorporación de organogeladores de bajo peso molecular y polímeros de coordinación o MOF. La revisión de este artículo se centra en las potenciales aplicaciones en el campo médico, farmacéutico, catálisis y detección de moléculas aprovechando sus propiedades luminiscentes y de autocuración.

Palabras clave: gel; geles metal-orgánicos; detección de moléculas; autocuración.

ABSTRACT

With the growing interest in the search for new advanced materials with a wide variety of applications, research on metal-organic gels (MOG) has emerged. This is due to their porous structure, large specific surface area, and the way they can be modified or modulated to exhibit porous structures. There are different strategies for incorporating metals into supramolecular gels, basing their designs on organogelators, including the incorporation of low molecular weight organogelators and coordination polymers (MOF). The review in this article focuses on potential applications in the medical, pharmaceutical,

1. Facultad de Química, Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable, Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, Estado de México, México.

2. 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
antoniotellez712@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0004-4212-2257>
Fecha de recepción
27 de octubre de 2025.
Fecha de aceptación
13 de mayo de 2026.

catalytic, and molecular detection fields, taking advantage of their luminescent and self-healing properties.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Keywords: gel; metal-organic gels; sensing; self-healing.

INTRODUCCIÓN

Un gel se compone principalmente de una pequeña cantidad de gelificante y un gran volumen de líquido. Típicamente, un gel se forma cuando una solución que contiene una concentración crítica de gelificante (MGC, por sus siglas en inglés) se calienta y enfría por debajo de una temperatura crítica (temperatura de transición sol-gel). Si el volumen total del líquido es capaz de soportar su propio peso bajo influencia la fuerza gravitacional (normalmente probado por la inversión del tubo), se le llama gel (Figura 1) (Adarsh & Dastidar, 2011).



Figura 1. Representación de un gel.

Los polímeros de coordinación o los también denominados MOF (por sus siglas en inglés metal organic frameworks), son materiales formados por metales (o iones metálicos) unidos por moléculas orgánicas que funcionan como puentes, llamados ligantes, una representación de dichos compuestos se muestra en la Figura 2. Se caracterizan por tener distintas propiedades generando múltiples funcionalidades (Miklaszewska & Wagner, 2025).

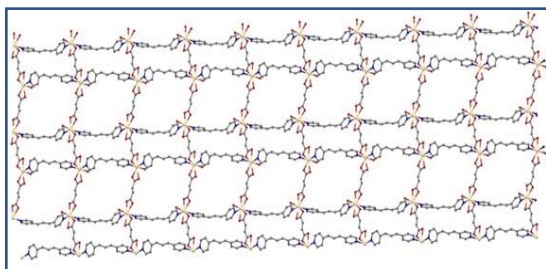


Figura 2. Estructura de un MOF, donde se observan los poros formados por el tipo de ligante.

Los geles metal-orgánicos han generado amplio interés debido a su potencial diseño en sistemas de materiales multifuncionales. Una de las principales razones se debe a su arquitectura basada en la reticulación de nodos metálicos por medio de ligantes orgánicos flexibles. Esto les confiere propiedades únicas, generando un comportamiento mecánico adaptable, que permite la formación de redes estables pero dinámicas capaces de soportar esfuerzos externos sin perder integridad estructural (Zhuang y col., 2020).

Las redes sólidas en los geles están compuestas de una pequeña cantidad (normalmente menos del 5 % en peso) de gelificantes poliméricos o gelificantes de bajo peso molecular. Esas moléculas gelificantes se autoensamblan en solventes orgánicos o agua a través de varias interacciones no covalentes reversibles, tales como puentes de hidrógeno, interacciones dipolares, interacciones electrostáticas y apilamiento π o efecto hidrofóbico, lo que facilita su crecimiento unidimensional para formar fibrillas (Sutar & Maji, 2016).

La incorporación de metales lábiles o aniones dentro de estos geles supramoleculares es de particular interés porque los GMO y polímeros de coordinación en gel con estructuras metal-orgánicas son aplicables en varios campos como la capacidad de respuesta redox, acción catalítica, luminiscencia, magnetismo y emisión de electrones (Lee y col., 2012).

Los GMO son materiales viscoelásticos blandos en los que un gran volumen de líquido (solventes gelificantes) es inmovilizado (gelificado) dentro de una red 3D generada por un enlace de coordinación entre ligantes orgánicos y centros metálicos que incluyen complejos de coordinación discretos, polímeros de coordinación infinitos y polímeros de coordinación con enlaces cruzados (Husain y col., 2015).

Por ello, los GMO han emergido como una de las plataformas más prometedoras en la ciencia de materiales contemporánea, contribuyendo significativamente al diseño racional de materiales multifuncionales con aplicaciones en sectores estratégicos de alto impacto tecnológico y ambiental.

METODOLOGÍA

TIPO DE ESTUDIO

Este manuscrito corresponde a una revisión bibliográfica de tipo sistemática con enfoque cualitativo y documental, orientada al análisis del estado del arte sobre geles metal-orgánicos. El objetivo general consistió en identificar, analizar y sintetizar la evidencia científica disponible relacionada con los métodos de síntesis, principales propiedades y sus aplicaciones.

FUENTES DE INFORMACIÓN

La recopilación de información se llevó a cabo mediante la consulta de bases de datos científicas internacionales indexadas y revisadas por pares, reconocidas por su rigor académico y amplia cobertura en el área de geles metal-orgánicos. Las bases de datos utilizadas fueron *ScienceDirect*, *Scopus* y *Wiley Online Library*. Estas plataformas permitieron acceder a artículos científicos, revisiones especializadas y publicaciones de alto impacto relacionadas con geles metal-orgánicos.

ESTRATEGIA DE BÚSQUEDA BIBLIOGRÁFICA

La búsqueda bibliográfica se realizó mediante el uso de palabras clave relacionadas con el tema de estudio, tanto en idioma inglés como en español, con el propósito de garantizar una cobertura amplia y representativa de la literatura científica. Se emplearon operadores booleanos (AND, OR, NOT) para optimizar la precisión y pertinencia de los resultados obtenidos.

Entre las principales formas de búsqueda utilizadas se incluyeron las siguientes:

- metal-organic gels AND synthesis
- metal-organic gels AND self-healing
- metal-organic gels OR mechanical properties
- metal-organic gels AND applied in sensing
- geles metal-orgánicos AND aplicaciones en liberación controlada de fármacos
- geles metal-orgánicos AND luminiscencia

El periodo temporal considerado comprendió publicaciones realizadas en los últimos quince años, con el fin de incluir avances recientes y tendencias emergentes en el desarrollo tecnológico de geles metal-orgánicos.

CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN

Se establecieron criterios específicos para la selección de la literatura científica con el propósito de garantizar la calidad, relevancia y pertinencia de la información recopilada.

Los criterios de inclusión fueron:

- Artículos científicos revisados por pares.
- Publicaciones relacionadas directamente con la síntesis, caracterización, propiedades, autocuración, luminiscencia y aplicaciones de los geles metal-orgánicos.
- Documentos publicados en idioma inglés.
- Estudios experimentales, teóricos y revisiones científicas especializadas.

Los criterios de exclusión incluyeron:

- Estudios duplicados identificados en diferentes bases de datos.
- Publicaciones sin acceso al texto completo.

PROCESO DE SELECCIÓN DE LITERATURA

El proceso de selección de la información se realizó mediante un filtrado progresivo basado en la revisión de títulos, resúmenes y textos completos de las publicaciones identificadas. Inicialmente, se efectuó una depuración para eliminar registros duplicados obtenidos en múltiples bases de datos. Posteriormente, se evaluó la pertinencia temática de los estudios mediante la lectura de resúmenes. Finalmente, se llevó a cabo la revisión detallada de los textos completos para seleccionar los trabajos que cumplieran con los criterios establecidos.

EXTRACCIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

La información relevante obtenida de los estudios seleccionados se organizó mediante matrices de análisis estructuradas, en las cuales se registraron variables específicas relacionadas con la síntesis, propiedades y aplicaciones

prácticas de los geles metal-orgánicos. Entre las variables consideradas se incluyeron los tipos de geles metal-orgánicos, métodos de síntesis, propiedades mecánicas, autocuración y luminiscencia. Además, aplicaciones en catálisis heterogénea, captura y almacenamiento de gases, detección de moléculas, liberación controlada de fármacos, remoción de contaminantes, almacenamiento de energía y materiales inteligentes.

El análisis de la información se realizó mediante una síntesis comparativa y crítica del contenido, permitiendo identificar similitudes, diferencias, avances tecnológicos y áreas de oportunidad en las aplicaciones de los geles metal-orgánicos.

ORGANIZACIÓN Y SÍNTESIS

Los hallazgos obtenidos se clasificaron y sistematizaron de acuerdo con las tendencias tecnológicas predominantes identificadas en la literatura científica especializada. La integración de la información se llevó a cabo considerando los avances más recientes en la optimización de la eficiencia, las estrategias orientadas a mejorar la estabilidad, las innovaciones en los métodos de síntesis y los principales retos tecnológicos, junto con las perspectivas futuras relacionadas con la aplicación de los geles metal-orgánicos. Esta estructuración facilitó la elaboración de un análisis integral y actualizado sobre el desarrollo científico y tecnológico en este campo de investigación.

DESARROLLO Y DISCUSIÓN

1. SÍNTESIS DE LOS GELES METAL-ORGÁNICOS (GMOS)

Entre diferentes criterios, la clasificación de los geles se basa generalmente en las fuerzas impulsoras de agregación molecular. Esto permite una distinción fundamental entre geles químicos (es decir, geles basados en enlaces covalentes, generalmente polímeros reticulados que no pueden redisolverse) y geles físicos (es decir, geles hechos de moléculas o polímeros de bajo peso molecular (LMW)), que se basan en enlaces no covalentes, principalmente enlaces de hidrógeno, Van der Waals, transferencia de carga, dipolo-dipolo,

apilamiento π - π , que típicamente conducen a transiciones reversibles de fase de gel a sol (Häring & Díaz, 2016).

El proceso de la formación de GMO se manifiesta en diferentes enfoques que incluyen redes de polímeros de coordinación, complejos de coordinación metálicos y organometálicos, polímeros de coordinación entrecruzados, e interacciones metal-ligante basados en la gelación. Diferentes iones de metales de transición como Co^{2+} , Cu^{2+} , Cd^{2+} , $\text{Fe}^{2+/3+}$, y Zn^{2+} son utilizados para la metalogelación con múltiples aplicaciones en ciencia y tecnología. Sin embargo, también se ha reportado la síntesis de metalogeles basados en iones de lantánidos como Eu^{3+} , Tb^{3+} .

Adicionalmente los GMO se pueden clasificar según su método de síntesis en:

- GMO puros: están constituidos únicamente por un metal o ion metálico y un ligante orgánico, aquí las redes del gel se forman por las interacciones físicas entre las moléculas que componen al MOF. Debido a esto se reduce la separación media entre las partículas a un entrecruzamiento formando así una red de gel a partir de los monómeros que lo conforman, como se muestra en la Figura 3 (Zhang y col., 2018).

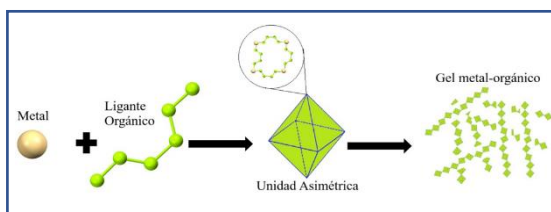


Figura 3. Esquema de la representación de GMO puros.

- GMO híbridos: en la Figura 4 se observa que los cristales de los MOF se encuentran incrustados en un componente gelificante como por ejemplo el grafeno y sus derivados. En esta clase las interacciones entre el MOF y la red del gel son débiles, donde el MOF se integra a la estructura del gel mediante síntesis *in situ* o por la agregación de nanopartículas de este en el gel (Zhuang y col., 2020).

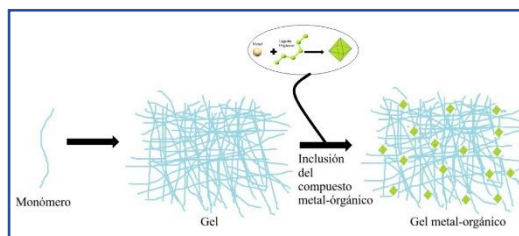


Figura 4. Esquema de la representación de GMO híbridos.

- GMO basados en reticulación: se forman por poliedros metal-orgánicos o cristales (nanocristales) de MOF que se reticulan mediante interacciones químicas o físicas fuertes y persistentes derivadas de los ligantes "entrecruzadores", que unen los compuestos metal-orgánicos observados en la Figura 5. Esta reticulación se puede dar mediante enlaces covalentes o coordinados, incluso mediante enlaces de hidrógeno o interacciones de van der Waals (Liu y col., 2023).

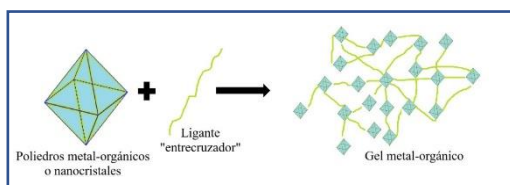
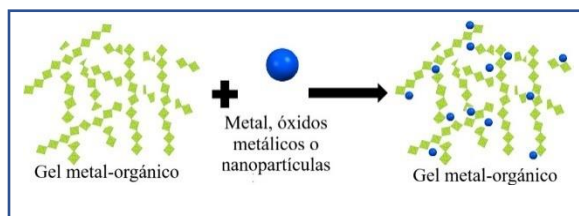


Figura 5. Esquema de la representación de GMO reticulados.

- Materiales derivados de los GMO: se muestran en la Figura 6 que tienen como precursor a un GMO o un material a base de gel, es decir, el nuevo gel formado proviene de la interacción de la red del compuesto metal-orgánico con el gel. Algunas ocasiones se generan por la incrustación de óxidos metálicos, metales o nanopartículas (Ma y col., 2023).

Figura 6. Esquema de la representación de GMO derivado.



La síntesis para los GMO puede seguir distintas rutas o metodologías dependiendo varios factores tales como la naturaleza metálica, el ligante o disolventes utilizados (se simplifica en el esquema de la Figura 7), por lo que las condiciones experimentales pueden ser:

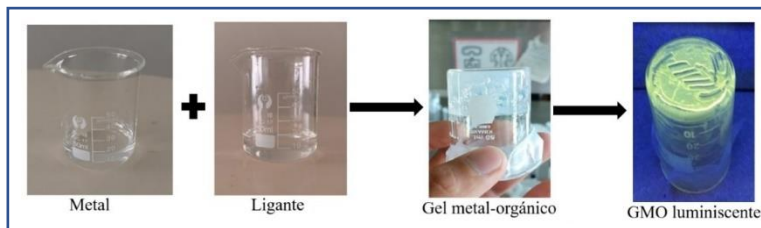


Figura 7. Esquema de la representación de la síntesis de un GMO (con propiedades luminiscentes).

- **Autoensamblaje:** la formación de GMO por autoensamble es una de las estrategias de síntesis más empleada en este campo, donde el crecimiento y modelado de estos materiales es controlado por interacciones supramoleculares intermoleculares y autocomplementarias; orientadas hacia la generación de una estructura matricial multidimensional. Para esto es necesario el diseño y creación de moléculas pequeñas que puedan dar lugar a la gelación con propiedades específicas, generando un gran desafío, ya que aquellas modificaciones, por mínimas que sean, pueden afectar en gran medida las propiedades macroscópicas del material resultante de una manera inesperada. Un ejemplo de esto se puede observar en los GMO formados con Ag^+ y 4,4'-bipiridina (Zhao y col., 2014).
- **Solvotérmico/hidrotermal:** se basa por la reacción de las sales metálicas y los ligantes orgánicos, en disolventes, mediante sistemas cerrados, con el uso de capsulas o viales herméticos a altas temperaturas (entre 80 y 200 °C). Estos disolventes usados actúan como medio y modulador de la reacción. Un ejemplo se puede observar en el GMO llamado UiO-66 (Zr-BDC) formado por Zr^{4+} y ácido 1,4-bencenodicarboxílico (BDC) (Zhuang y col., 2020).
- **Entrecruzamiento de enlaces por polimerización de coordinación:** se orienta la formación de los GMO por la reacción gradual entre metales multivalentes (Co^{2+} , Cu^{2+} , y Zn^{2+}) y ligantes multidentados (ácidos policarboxílicos, triazoles, etc.). Se caracteriza por tener control del grado de reticulación, rigidez y porosidad. Se puede observar en el gel Zn-BDC sintetizado por coordinación progresiva en DMF (Zhang y col., 2018).
- **Enfriamiento o sol-gel:** ocurre en una solución homogénea que contiene al metal y al ligante, donde la solución se transforma en gel

por la evaporación, enfriamiento o cambios en el pH. Se utiliza frecuentemente en geles reversible o regenerativos, como en los geles de Fe^{3+} y ácido tartárico que se gelifica al enfriar o incluso en algunos con Zr (Shaiful y col., 2021).

- Conversión de MOF a gel: se obtiene cuando un MOF parcialmente cristalino o coloidal se dispersa en un disolvente adecuado y se transforma en un gel (GMO) por la ruptura parcial de los enlaces o entrecruzamientos secundarios de enlaces. Se puede observar en la conversión de MIL-100(Fe), dicho compuesto se forma por la interacción del ligante ácido trimesico con el Fe^{3+} , en gel mediante redisolución parcial (Li y col., 2025).
- Métodos asistidos: se centra en la síntesis por microondas, ultrasonido o sin disolventes; los cuales buscan reducir el tiempo y el consumo energético, se caracterizan por ser una síntesis rápida (minutos), tener buen control del tamaño de partícula y la estructura de gel. Además de ser compatibles con estrategias sostenibles, como el caso de GMO Cu-triazol, sintetizado por microondas durante tres minutos a 120 °C (Cao y col., 2019).

Hoy en día, la síntesis de GMO ha sido generada principalmente por el uso de gelificantes orgánicos que han sido descubiertos casualmente. Sin embargo, recientemente el concepto de geles supramoleculares de multicomponentes ha sido introducido, donde, por ejemplo, los iones en conjunto con los agentes gelificantes basados en ligantes de coordinación con metales se han venido utilizando para obtener un mejor control sobre la estructura (y por lo tanto, morfología), así como sobre sus propiedades físicas y posibles aplicaciones (Martínez y col., 2015).

2. PRINCIPALES PROPIEDADES DE LOS GMO

Debido a sus fascinantes y múltiples propiedades, así como sus características estructurales, los GMO se han utilizado para diversas aplicaciones inminentes en una amplia gama de industrias científicas y comerciales. Así, los GMO han ganado una posición sólida en la investigación científica.

2.1 Propiedades mecánicas



Las propiedades reológicas proporcionan información del comportamiento de los geles cuando son sometidos a estrés mecánico, especialmente al módulo de "almacenamiento" (o "elástico") G' , el cual representa la habilidad del material deformado para regresar a su forma original, y el módulo de "pérdida" (o "viscosidad") G'' , el cual representa la tendencia del material a fluir bajo estrés.

Dos criterios reológicos requeridos para un gel son: 1) la independencia del módulo elástico dinámico, G' , con respecto a la frecuencia oscilatoria, y 2) G' debe exceder la pérdida del módulo G'' en alrededor de un orden de magnitud.

En general las propiedades reológicas de los polímeros de coordinación en gel son dependientes de la concentración del ión central, así como de los ligantes o moléculas gelificantes. Esto se puede comprobar con los siguientes trabajos reportados:

- Se realizó un barrido de deformación dinámica para definir las condiciones del análisis reológico en geles con distintas concentraciones de Zn^{2+} . En el rango de 0.1–1.0 % de deformación, G predominó sobre G'' , confirmando el comportamiento gelificado. Con 1.0 equivalente de Zn^{2+} , ambos módulos aumentaron notablemente frente a 0.3 y 0.6 equivalentes, evidenciando mayor estabilidad estructural debido a la formación de un complejo 1:1 entre el ligante tetrazólico y el Zn^{2+} (Lee y col., 2012).
- Los estudios reológicos confirman la naturaleza viscoelástica de estos materiales. El módulo de almacenamiento (G), asociado a la energía almacenada, es significativamente mayor que el módulo de pérdida (G''), relacionado con la energía disipada. En particular, para el metalogel Fe@TETA, el predominio de G sobre G' a determinada concentración evidencia su estabilidad estructural y su comportamiento predominantemente sólido (Dhibar y col., 2020).
- La afinidad entre los iones metálicos y los ligantes influye directamente en el comportamiento reológico de los geles. Los geles de Tb(III) y Eu(III) presentan una débil dependencia con la frecuencia y un

comportamiento predominantemente sólido ($G' > G''$), dentro de los valores característicos de un gel. En la mezcla Eu(III)/Tb(III), G'' se aproxima a G' a altas frecuencias, indicando una transición hacia un comportamiento más líquido. A bajas deformaciones, todos los sistemas muestran respuesta sólida hasta alcanzar la deformación de rendimiento, punto en el que el gel comienza a fluir y G' disminuye (Martínez y col., 2015).

2.2 Autocuración

Una de las propiedades más fascinantes de los materiales biológicos es su habilidad para regenerarse y curarse después de recibir un daño físico. De aquí que surge la idea para poder sintetizar materiales blandos con propiedades de autocurado.

El origen de algunos procesos naturales de autocuración (por ejemplo, fusión de huesos rotos, recuperación de la pared celular tras la deformación de la madera) se puede encontrar en la presencia de enlaces de sacrificio entre moléculas, que al romperse y reformarse permiten una mejor adaptación de los biomateriales a condiciones externas y generando así la reparación de materiales dañados (Zhang y col., 2019).

Los GMO son materiales que pueden presentar dicha propiedad, es decir, que presentan la capacidad de repararse a sí mismos después de sufrir un daño físico (fractura, corte o deformación), sin necesidad de intervención externa significativa. Lo que permite la autocuración en los GMO es la reversibilidad de los enlaces de coordinación, siguiendo el siguiente mecanismo:

1. Daño mecánico: cuando el gel se corta o deforma, se pueden romper los enlaces de coordinación entre el metal y el ligante, o incluso las interacciones no covalentes como puentes de hidrógeno o apilamiento π - π .
2. Reorganización espontánea: debido a la naturaleza de los enlaces que se encuentran en los GMO, que son dinámicos y reversibles. Los fragmentos pueden reconectarse de manera natural.
3. Recuperación de estructura y propiedades: el gel puede recuperar su forma, integridad estructural y en la mayoría de los casos, sus propiedades mecánicas y funcionales (conductividad o fluorescencia) (Sharma y col., 2019).

Esta propiedad se observa en algunos trabajos publicados donde algunos GMO fueron estudiados:

- El GMO presenta propiedades macroscópicas de autocurado, evidenciadas por la desaparición completa de una grieta de 6 mm en catorce minutos. Este comportamiento se atribuye a interacciones dinámicas y reversibles de coordinación metal-ligante que permiten la regeneración de la red del gel (Zhang y col., 2019).
- El monolito de GMO basado en ácido oxálico (CuA-Ox) mostró claras propiedades de autocurado sin afectar su desempeño al ser dopado con colorantes. Los geles presentaron autosoporte, buena capacidad de carga y maleabilidad, permitiendo su corte en bloques sin pérdida de líquido. Al poner en contacto bloques alternados (dopado/no dopado), estos se fusionaron espontáneamente en cinco horas sin agentes externos; este tiempo se redujo a diez minutos mediante sonicación durante aproximadamente 2 minutos (Feldner y col., 2016).
- Se sintetizó un GMO débil y autocurable empleando el ligante tritópico BTC con $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ($G' \approx 250 \text{ Pa}$). El gel Ni_2 BTC mostró autocurado macroscópico en 48 h tras daño, a diferencia de un gel HAS con módulo similar que no presentó curación. Los ensayos de deformación evidenciaron recuperación inmediata pero parcial de la elasticidad después del cizallamiento. Ciclos repetidos provocaron fatiga asociada a menor conectividad estructural. En distintos protocolos, el gel recuperó una fracción significativa de su elasticidad, aunque no completamente (Terech y col., 2013).

Como se puede apreciar la capacidad de autocuración ya se puede discernir en las mediciones de recuperación por fluencia en el régimen lineal de deformaciones. Estos materiales autocurables pueden presentar magníficas propiedades no solo a nivel microscópico, sino a nivel macroscópico, dejando así el camino para múltiples aplicaciones como la liberación controlada de fármacos y catálisis (Marzabad y col., 2025).



2.3 Luminiscencia

Recientemente, ha aumentado el interés en el estudio de los GMO, debido a las amplias propiedades espectroscópicas y de luminiscencia exhibidas por una gran variedad de complejos de metales de transición (Lam y col., 2008).

Los GMO luminiscentes representan una clase sobresaliente de gelificantes. La presencia de interacciones metalofílicas y/o fuerzas no covalentes puede conducir a variaciones en las capacidades de gelificación y fascinantes propiedades fotofísicas (Iranifam, 2024).

Los estados excitados de transferencia de carga de metal a ligante (MLCT, por sus siglas en inglés) de estos sistemas organometálicos luminiscentes están bien documentados para mostrar grandes cambios de respuesta a las variaciones en el medio ambiente. Se cree que las abundantes propiedades fotofísicas de los estados excitados por MLCT de estos sistemas de complejos metálicos sirven como indicadores y sondeos espectroscópicos versátiles para los cambios en el ambiente. Además, el delicado equilibrio y la conformación de las interacciones no covalentes en estos gelificantes pueden modificarse fácilmente mediante la elección juiciosa y el diseño racional de los ligantes de coordinación en el sistema organometálico, puede dar lugar a un ajuste fino de las propiedades de gelificación de los gelificantes orgánicos de baja masa molecular (Lam y col., 2008). A continuación, se presentan algunos ejemplos de GMO luminiscentes:

- Se realizó un estudio de GMO de tricarbonil diimina alquilrenio(II) mediante espectroscopía UV-Vis dependiente de la temperatura (25–75 °C). Al aumentar la temperatura la banda MLCT ($\approx 400\text{--}450\text{ nm}$) disminuyó en absorbancia, coincidiendo con la transición de gel opaco a sol transparente en hexano y DMSO. Estos cambios se atribuyen a procesos de agregación en DMSO, asociados a interacciones de apilamiento π entre entidades aromáticas (Lam y col., 2008).
- Los GMO obtenidos a partir de 1,3,5-tris(3-piridilmetoxil) benceno y sales de Cd^{2+} , Hg^{2+} y Cu^{2+} presentan estructuras nanofibrosas y una luminiscencia blanca y verde al ser excitados a 325 nm. Esta emisión se atribuye a la interacción metal-ligante y a interacciones π - π . Además, demostraron potencial como sensores de compuestos

nitroaromáticos, como nitrobenzeno y 2,4-dinitrofenol (Roy y col., 2014).

- Se reportaron tres GMO fluorescentes sintetizados con Zn (OAc)₂·2H₂O, bpd y distintos ácidos dicarboxílicos, destacando el GMO 1 (con ácido tartárico) por su intensa emisión. Bajo excitación a 300 nm, el GMO 1 emite fuertemente a 455 nm debido a la transición $\pi-\pi^*$, mostrando mayor fluorescencia que el ligante libre y el complejo precursor. Los sistemas 2 y 3 emiten en la misma región, pero con menor intensidad. La mejora en la fluorescencia se atribuye a la mayor rigidez estructural inducida por la gelificación, que restringe movimientos moleculares y reduce procesos no radiativos (Batabyal y col., 2010).
- Se llevó a cabo la síntesis a temperatura ambiente de un GMO formado por Eu, Tb con el ligante 4'-(4-carboxifenil)-2,2':6',2"-terpiridina, teniendo una emisión electroquimioluminiscente cuando se excita alrededor de los 679 nm, exhibiendo alta estabilidad. Aplicándose en la detección de epinefrina con un muy buen rango lineal, límite de detección bajo (Xie y col., 2020).
- Se desarrollo un GMO termofijado basado en Tb³⁺ (H6L/Tb) con luminiscencia estable, utilizando H6L como ligante. El gel presenta una banda de excitación amplia (250–400 nm) y emisión a 544 nm. Los estudios a distintas temperaturas mostraron que la mezcla H6L/Tb³⁺ casi no emite entre 0–25 °C y presenta emisión débil hasta 55 °C; sin embargo, la luminiscencia aumenta notablemente entre 55–75 °C. Esto indica que el calentamiento favorece el autoensamblaje del sistema, promoviendo su emisión luminiscente (Zhang y col., 2020).

Como se ha podido ver en estos ejemplos la luminiscencia de un gel generalmente depende de la formación de un estado de gel de tipo sólido; por lo tanto, la luminiscencia comenzará a desaparecer a medida que se destruye la estructura supramolecular del gel.

3. APLICACIONES

Se han dedicado numerosos esfuerzos al desarrollo de GMO sensibles a los estímulos, donde las propiedades del sistema se pueden activar/desactivar o



ajustar en presencia de un estímulo químico o físico externo o interno (Rajamalli & Prasad, 2011). Derivado de ello se pueden observar una gran variedad de posibles aplicaciones que pueden tener los GMO en distintas áreas como farmacéuticas, biomédicas, remediación ambiental, catálisis, electroquímica y adsorción (Tabla 1).

Tabla 1. Aplicaciones de los GMO.

GMO	Aplicación	Descripción
Sistema formado por Cu(II) y como ligante el H ₂ btca (benzotriazol-5-carboxílico).	Catálisis heterogénea.	Este GMO mostró un excelente desempeño en reacciones de oxidación y reducción selectiva. Se emplea en la adsorción de colorantes, ya que cuenta con alta reusabilidad, fácil recuperación del catalizador y la posibilidad de ajustar la actividad modificando el metal o el ligante (Cao y col., 2023).
Sistema formado por Zn(II) y como ligante el ácido tereftálico (BDC).	Captura y almacenamiento de gases.	Su alta porosidad estructural, le permite presentar una adsorción en distintos gases tales como CO ₂ , H ₂ o CH ₄ . Luego entonces, apoyan a la mitigación de gases de efecto invernadero, purificación de mezclas gaseosas y almacenamiento de energía (Qiu y col., 2017).
Sistema formado por Eu(III) y como ligante el ácido benzoico.	Detector de moléculas (Sensor luminiscente).	Pueden exhibir fluorescencia, fosforescencia o respuesta lumínica según sea su entorno, este GMO, presenta una emisión roja intensa en presencia de compuestos nitroaromáticos, por lo que puede ser utilizado como sensor óptico de explosivos (Tharra & Baire, 2017).
Sistema formado por Zn(II) y como ligante el imidazolato.	Liberación controlada de fármacos.	Por su naturaleza blanda, porosidad y respuesta a distintos estímulos como pH, luz, temperatura, los GMOs pueden ser utilizados en la liberación controlada, este sistema permitió la liberación de ibuprofeno de forma sostenida durante 72 horas, evitando picos de concentración, lo que permite una administración localizada (Shang y col., 2019).
Sistema formado por Fe(III) y como ligante el 2-metilimidazolato.	Remoción de contaminantes.	Puede usarse para el tratamiento de aguas contaminadas y la remediación ambiental. Ya que este compuesto es capaz de adsorber contaminantes orgánicos como azul de metileno en agua (Zhao y col., 2020).
Sistema formado por Co(II) y como ligante el ácido tereftálico.	Dispositivos electroquímicos y almacenamiento de energía.	Material usado para supercapacitores, debido a que presentan una conductividad iónica y/o electrónica. Tiene una estructura tridimensional que promueve la conducción empleándolo como electrodo con buena estabilidad y capacidad de almacenamiento de carga (Shao y col., 2018).
Sistema formado por Cu(II) y como ligante la piridina.	Materiales inteligentes (autocurativos).	Este GMO responde a variaciones de pH restaurando su estructura después de haber recibido daño, lo que lo vuelve útil en la aplicación de materiales inteligentes (Roy y col., 2022).

CONCLUSIONES

Los geles metal orgánicos (GMO) se presentan como una variante emergente de materiales híbridos que combinan la gran versatilidad de los compuestos de coordinación (PC y MOF) con la funcionalidad de los geles. Dicha estructura (1D, 2D y 3D), basada en interacciones de coordinación reversibles y redes supramoleculares, les confiere una notable estabilidad, capacidad de respuesta a estímulos externos y en ocasiones porosidad; lo que los vuelve de gran interés científico y tecnológico.

A lo largo de la última década, el diseño racional de GMO mediante la selección estratégica de metales y ligantes ha permitido modular las propiedades mecánicas, luminiscentes, ópticas y de autocuración, estableciendo una clara relación entre estructura y función. Asimismo, los avances en métodos de síntesis, caracterización reológica y estudios espectroscópicos han contribuido significativamente a comprender los mecanismos de autoensamblaje, el comportamiento viscoelástico y los procesos de autorreparación asociados a las interacciones dinámicas metal-ligante.

Como resultado, los GMO han demostrado un amplio potencial en aplicaciones prácticas como catálisis, sensores ópticos, captura de gases, liberación controlada de fármacos, tratamiento de aguas, almacenamiento de energía, por mencionar algunas. No obstante, persisten desafíos importantes, entre ellos, el control preciso de la arquitectura supramolecular, la mejora de la estabilidad a largo plazo, la escalabilidad de los procesos de síntesis y su integración en dispositivos funcionales.

En perspectiva, el desarrollo de estrategias sintéticas más sostenibles, el diseño de sistemas multifuncionales y la comprensión profunda de las interacciones dinámicas en estos materiales serán determinantes para consolidar a los GMO como plataformas tecnológicas versátiles en aplicaciones avanzadas.

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 CAT2024-0006. Además del financiamiento otorgado por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- Adarsh, N. N., & Dastidar, P. (2011). A New Series of Zn II Coordination Polymer Based Metallogels Derived from Bis-pyridyl-bis-amide Ligands: A Crystal Engineering Approach. *Crystal Growth & Design*, 11: 328–336. DOI: <https://doi.org/10.1021/cg101342g>
- Batabyal, S. K., Leong, W. L., & Vittal, J. J. (2010). Fluorescent Coordination Polymeric Gel from Tartaric Acid-Assisted Self-Assembly. *Langmuir*, 26: 7464–7468. DOI: <https://doi.org/10.1021/la904185c>
- Cao, W., Lin, Z., Zheng, D., Zhang, J., Heng, W., Wei, Y., Gao, Y., & Qian, S. (2023). Metal–organic gels: recent advances in their classification, characterization, and application in the pharmaceutical field. *Journal of Materials Chemistry B*, 11: 10566–10594. DOI: <https://doi.org/10.1039/D3TB01612A>
- Cao, Z., Jiang, Z., Li, Y., Huang, C., & Li, Y. (2019). Metal–Organic Gel-Derived Multimetal Oxides as Effective Electrocatalysts for the Oxygen Evolution Reaction. *ChemSusChem*, 12: 2480–2486. DOI: <https://doi.org/10.1002/cssc.201900194>
- Dhibar, S., Dey, A., Ghosh, D., Majumdar, S., Dey, A., Ray, P. P., & Dey, B. (2020). Triethylenetetramine-Based Semiconducting Fe(III) Metallogel: Effective Catalyst for Aryl–S Coupling. *ACS Omega*, 5: 2680–2689. <https://doi.org/10.1021/acs.omega.9b03194>
- Feldner, T., Häring, M., Saha, S., Esquena, J., Banerjee, R., & Díaz, D. D. (2016). Supramolecular Metallogel That Imparts Self-Healing Properties to Other Gel Networks. *Chemistry of Materials*, 28: 3210–3217. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.6b01144>

- Häring, M., & Díaz, D. D. (2016). Supramolecular metallogels with bulk self-healing properties prepared by in situ metal complexation. *Chemical Communications*, 52: 13068–13081. DOI: <https://doi.org/10.1039/C6CC06533C>
- Husain, A., Parveen, R., & Dastidar, P. (2015). New Series of Zn II /Cd II Mixed Ligand Coordination Polymers: Toward the Design of Metallogels. *Crystal Growth & Design*, 15: 5075–5085. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.5b01044>
- Iranifam, M. (2024). MOFs-, COFs- and MOGs-assisted chemiluminescence methods. *Microchemical Journal*, 199: 110096. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.110096>
- Lam, S.-T., Wang, G., & Yam, V. W.-W. (2008). Luminescent Metallogels of Alkynylrhodium(II) Tricarbonyl Diimine Complexes. *Organometallics*, 27: 4545–4548. DOI: <https://doi.org/10.1021/om800610x>
- Lee, H., Kang, S., Lee, J. Y., & Jung, J. H. (2012). Coordination polymer gel derived from a tetrazole ligand and Zn²⁺: spectroscopic and mechanical properties of an amorphous coordination polymer gel. *Soft Matter*, 8: 2950. DOI: <https://doi.org/10.1039/c2sm07231a>
- Li, C., Zhang, X., Li, Y., & Meng, Z. (2025). Ligand competition strategy-induced metal-organic gel MOG-808 for the detection and removal of Cr(VI) from celery juice. *Food Chemistry*, 495: 146445. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.146445>
- Liu, G., Li, S., Shi, C., Huo, M., & Lin, Y. (2023). Progress in Research and Application of Metal–Organic Gels: A Review. *Nanomaterials*, 13: 1178. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano13071178>
- Ma, S., Xu, J., Sohrabi, S., & Zhang, J. (2023). Metal–organic gels and their derived materials for electrochemical applications. *Journal of Materials Chemistry A*, 11: 11572–11606. DOI: <https://doi.org/10.1039/D3TA01221B>
- Martínez, M., Kotova, O., Möbius, M. E., Bell, A. P., McCabe, T., Boland, J. J., & Gunnlaugsson, T. (2015). Healable Luminescent Self-Assembly Supramolecular Metallogels Possessing Lanthanide (Eu/Tb) Dependent Rheological and Morphological Properties. *Journal of the American Chemical Society*, 137: 1983–1992. DOI: <https://doi.org/10.1021/ja511799n>
- Marzabad, M. A., Chattopadhyay, S., Hietala, S., Nonappa, N., Marek, R., & Jurček, O. (2025). Robust Self-Healing Metallo-Supergels of Folic Acid: Potential Sustainable Gelator for Oilfield Applications. *Chemistry – A European Journal*, 31: 202500748. DOI: <https://doi.org/10.1002/chem.202500748>
- Miklaszewska, P., & Wagner-Wysiecka, E. (2025). The color code: MOFs unlocking new horizons in chemical sensing. *Applied Materials Today*, 47: 102966. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2025.102966>

- Qiu, J., Hajibabaei, H., Nellist, M. R., Laskowski, F. A. L., Hamann, T. W., & Boettcher, S. W. (2017). Direct in Situ Measurement of Charge Transfer Processes During Photoelectrochemical Water Oxidation on Catalyzed Hematite. *ACS Central Science*, 3: 1015–1025. DOI: <https://doi.org/10.1021/acscentsci.7b00310>
- Rajamalli, P., & Prasad, E. (2011). Low Molecular Weight Fluorescent Organogel for Fluoride Ion Detection. *Organic Letters*, 13: 3714–3717. DOI: <https://doi.org/10.1021/ol201325j>
- Roy, M., Adhikary, A., Saha, S., & Mondal, R. (2022). Toxic metal–organic gels using a unique pyridine–pyrazole based ligand with Pb(II), Cd(II) and Hg(II) salts: multi-stimuli responsiveness and toxic dye adsorption. *Materials Advances*, 3: 7328–7338. DOI: <https://doi.org/10.1039/D2MA00483F>
- Roy, S., Katiyar, A. K., Mondal, S. P., Ray, S. K., & Biradha, K. (2014). Multifunctional White-Light-Emitting Metal–Organic Gels with a Sensing Ability of Nitrobenzene. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 6: 11493–11501. DOI: <https://doi.org/10.1021/am502146m>
- Shaiful Bahari, A. M., Othman, S. Z., Mohamad Fadli, M. F., Zulkifli, M. Z. A., Biyamin, S. A., Islam, M. A., Aspanut, Z., Amin, N., & Misran, H. (2021). Facile synthesis of Zr-based metal-organic gel (Zr-MOG) using “green” sol-gel approach. *Surfaces and Interfaces*, 27: 101469. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2021.101469>
- Shang, S., Yuan, B., Sun, Y., Chen, G., Huang, C., Yu, B., He, S., Dai, H., & Chen, X. (2019). Facile preparation of layered melamine-phytate flame retardant via supramolecular self-assembly technology. *Journal of Colloid and Interface Science*, 553: 364–371. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.06.015>
- Shao, J., Jiang, T., Tang, W., Chen, X., Xu, L., & Wang, Z. L. (2018). Structural figure-of-merits of triboelectric nanogenerators at powering loads. *Nano Energy*, 51: 688–697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.07.032>
- Sharma, N., Sharma, P. K., Singh, Y., & Nagaraja, C. M. (2019). A Self-Healing Metal–Organic Gel (MOG) Exhibiting pH-Responsive Release of a Chemotherapeutic Agent, Doxorubicin: Modulation of Release Kinetics by Partial Dehydration of Matrix. *ACS Omega*, 4: 1354–1363. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b02833>
- Sutar, P., & Maji, T. K. (2016). Coordination polymer gels: soft metal–organic supramolecular materials and versatile applications. *Chemical Communications*, 52: 8055–8074. DOI: <https://doi.org/10.1039/C6CC01955B>
- Terech, P., Yan, M., Maréchal, M., Royal, G., Galvez, J., & Velu, S. K. P. (2013). Characterization of strain recovery and “self-healing” in a self-assembled metallo-gel. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 15: 7338. DOI: <https://doi.org/10.1039/c3cp50671a>

- Tharra, P., & Baire, B. (2017). Unconventional Reactivity of (Z)-Enoate Propargylic Alcohols in the Presence of Acids. *Chemistry – A European Journal*, 23: 2014–2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/chem.201605654>
- Xie, Z., Sun, P., Wang, Z., Li, H., Yu, L., Sun, D., Chen, M., Bi, Y., Xin, X., & Hao, J. (2020). Metal–Organic Gels from Silver Nanoclusters with Aggregation-Induced Emission and Fluorescence-to-Phosphorescence Switching. *Angewandte Chemie International Edition*, 59: 9922–9927. DOI: <https://doi.org/10.1002/anie.201912201>
- Zhang, B., Dong, X., Xiong, Y., Zhou, Q., Lu, S., Liao, Y., Yang, Y., & Wang, H. (2020). A heat-set lanthanide metallogel capable of emitting stable luminescence under thermal, mechanical and water stimuli. *Dalton Transactions*, 49: 2827–2832. DOI: <https://doi.org/10.1039/C9DT04713A>
- Zhang, J., Hu, Y., & Li, Y. (2018). Chapter Three – Gel Chemistry. Carpenter B., Ceroni P., Kirchner B., Landfester K., Leszczynski J., Luh T., Perl E. & Polfer N. (Eds.), *Metal–Organic Gels* (pp. 61–118). Singapore: Springer Nature. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-6881-2_3
- Zhang, Q., Tang, D., Zhang, J., Ni, R., Xu, L., He, T., Lin, X., Li, X., Qiu, H., Yin, S., & Stang, P. J. (2019). Self-Healing Heterometallic Supramolecular Polymers Constructed by Hierarchical Assembly of Triply Orthogonal Interactions with Tunable Photophysical Properties. *Journal of the American Chemical Society*, 141: 17909–17917. DOI: <https://doi.org/10.1021/jacs.9b09671>
- Zhao, H., Jiang, Y., Liu, H., Long, Y., Wang, Z., & Hou, Z. (2020). Direct synthesis of allyl alcohol from glycerol over CoFe alloy. *Applied Catalysis B: Environmental*, 277: 119187. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2020.119187>
- Zhao, H., Shi, Q., Xiao, H., & Li, X. (2014). Supramolecular approach to metal–organic gels using excess organic ligand as building units. *Journal of Porous Materials*, 21: 691–697. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10934-014-9816-5>
- Zhuang, Z., Mai, Z., Wang, T., & Liu, D. (2020). Strategies for conversion between metal–organic frameworks and gels. *Coordination Chemistry Reviews*, 421: 213461. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2020.213461>

IMPORTANCIA DE LA POROSIDAD DE LAS PARTÍCULAS QUE SE PROCESAN A TRAVÉS DE FLOTACIÓN DE ESPUMA: UNA REVISIÓN

IMPORTANCE OF PARTICLE POROSITY IN MATERIALS PROCESSED THROUGH FROTH FLOTATION: A REVIEW

RESUMEN

El efecto de los minerales ganga porosos desempeña un papel importante en la flotación de minerales metálicos, no metálicos y rocas como el carbón. Este artículo proporciona una revisión bibliográfica que demuestra los retos que enfrenta la flotación de espuma en la separación de minerales ganga porosos contenidos en minerales comerciales. Sin embargo, en la superficie de los minerales la estructura porosa es compleja y presenta heterogeneidad particular de acuerdo con el tipo de mineral y/o roca. Por lo tanto, para el desarrollo de la revisión bibliográfica se aplicó un enfoque transversal para incluir los diversos fenómenos físicos y químicos relacionados con la porosidad de un mineral y/o roca comercial. El concepto se define como “red estructural de diversos minerales que forman poros”. Con este enfoque y concepto el objetivo del presente trabajo fue ilustrar las características y la importancia de las redes estructurales en la formación de poros y su efecto sobre los fundamentos de la flotación de espuma (e.g., flotabilidad, hidrofobicidad, flotación verdadera etc.). Cinco casos de estudio fueron seleccionados para ilustrar la porosidad de diversos minerales y su impacto en los fundamentos de la flotación (así como en las respuestas metalúrgicas, grado y recuperación). La información se procesó a través de una rutina de análisis de imágenes fácil de comprender y aplicar para analizar la porosidad de los minerales y/o rocas de interés. Los resultados demostraron que la revisión bibliográfica es robusta y crítica. Asimismo, la revisión describe el impacto negativo de la porosidad en la flotación selectiva de minerales metálicos (e.g., CuFeS_2), no metálicos y rocas (e.g., carbón) que fueron seleccionados en el presente trabajo.

Palabras clave: porosidad; minerales ganga porosos; flotación de espuma; partículas porosas.

MACÍAS VIRAMONTES, Luis Alberto ¹

LÓPEZ SAUCEDO, Felipe de Jesús ²

CARRILLO PEDROZA, Francisco Raúl ¹

DÍAZ FLORES, Laura Lorena ³

BATISTA RODRÍGUEZ, José Alberto ²

BATISTA CRUZ, Ramón Yosvanis ²

ALMAGUER CARMENATES, Yuri ²

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.

3. División Académica de Ingeniería
y Arquitectura, Universidad Juárez
Autónoma de Tabasco.
Cunduacán, Tabasco, México.

Correspondencia
albertoviramontes@uadec.edu.mx
<https://orcid.org/0009-0009-2522-7176>

Fecha de recepción

19 de noviembre de 2025.

Fecha de aceptación

13 de marzo de 2026.

ABSTRACT

Non-metallic minerals, and rocks such as coal. This article provides a literature review that highlights the challenges faced by froth flotation in the separation of porous gangue minerals contained in commercial ores. However, on the surface of minerals, the porous structure is complex and exhibits specific heterogeneity depending on the type of mineral and/or rock. Therefore, for the development of this literature review, a cross-sectional approach was applied to include the various physical and chemical phenomena related to the porosity of a commercial mineral and/ or rock. The concept is defined a “structural network of various minerals that form pores”. With this approach and definition, the objective of the present work was to illustrate the characteristics and importance of structural networks in pore formation and their effect on the fundamentals of froth flotation (e.g; floatability, hydrophobicity, true flotation, etc.). Five case studies were selected to illustrate the porosity of different minerals and its impact on flotation fundamentals (as well as on metallurgical responses, grade, and recovery). The information was processed through an easy-to-understand image analysis routine designed to evaluate the porosity of the minerals and/or rocks of interest. The results demonstrated that the literature review is robust and critical. Additionally, the review describes the negative impact of porosity on the selective flotation of metallic minerals (e.g; CuFeS_2), non-metallic minerals, and rocks (e.g; coal) selected in this study.

Keywords: porosity; porous gangue minerals; froth flotation; porous particles.

INTRODUCCIÓN

En el campo de la ingeniería de procesos minero-metalúrgicos, la flotación es una de las técnicas más empleadas para la concentración de minerales con valor económico y tecnológico (Azizi y col., 2015; Batjargal y col., 2023; Masdarian y col., 2020). No obstante, la eficiencia de este proceso se ve comprometida significativamente con la presencia de minerales porosos presentes en la ganga mineral (NSG) (Hassanzadeh y col., 2021; Krūmiņš y col., 2022; Laskowski y col., 2023; Tabatabaei y col., 2014). A diferencia de los minerales de estructura compacta aquellos que presentan una alta porosidad interna poseen una superficie específica mucho mayor, lo que se

traduce en una tendencia elevada a retener agua en sus estructuras capilares (Aksu y col., 2015; Mercedes y col., 2022; Molina y col., 2009; Rosas Licon y col., 2024; Uribe y col., 2021). Esta retención de agua no solo altera las condiciones físico-químicas de la superficie del mineral, sino que también limita la adsorción de los colectores y la adherencia de las burbujas (Caballero y col., 2022; Elizondo-Alvarez y col., 2022; Laskowski y col., 2023; Ran y col., 2019). Recientes investigaciones han demostrado que la porosidad de los minerales desempeña un papel crucial en su comportamiento hidrodinámico y de mojabilidad (Hassanzadeh y col., 2021; Shen y col., 2020; Xia y col., 2021; Zhu y col., 2020). Los poros actúan como estructura que permite almacenar agua y que favorece la formación de películas líquidas internas, las cuales son difíciles de desplazar mediante métodos convencionales de acondicionamiento (Shen y col., 2020; Xia y col., 2021). Esta condición impide una adecuada transición de una superficie hidrofílica a hidrofóbica, incluso bajo la acción de colectores ampliamente utilizados (Atrafi y col., 2012; Cook y col., 2023; Elizondo-Alvarez y col., 2021; Elizondo-Alvarez y col., 2020; Pugh y col., 1985; Shu y col., 2020; Xing y col., 2017). A ello se suma la influencia de parámetros operativos como el tiempo de pre-mojado y el tipo de acondicionamiento empleado, los cuales afectan directamente el grado de saturación de los poros y, por ende, la eficiencia global del proceso de flotación (Chambi y col., 2020; Hassanzadeh y col., 2021; Hassanzadeh y col., 2022; Kemp Cañon y col., 2018; Mao y col., 2019; Szmiguel y col., 2024; Zhang y col., 2024). En respuesta a esta problemática, se han propuesto alternativas como el uso de colectores más específicos (e.g., Oleato de sodio) o incluso esquemas sin acondicionamiento previo (Atrafi y col., 2012; Mao y col., 2020a; Mao y col., 2020b; Pugh y col., 1986; Xie y col., 2021).

Diversas investigaciones han demostrado la importancia de los minerales ganga no sulfurados (NSG), particularmente las arcillas y el carbono orgánico como factores críticos que agravan la ineficiencia en procesos de flotación de sulfuros metálicos (Cordeiro y col., 2018; Elizondo-Alvarez y col., 2022; Foszcz y col., 2011; Gredelj y col., 2009; Konieczny y col., 2011; Laskowski y col., 2000; Pan y col., 2022; Tabatabaei y col., 2014). Estos minerales NSG, al interactuar con los minerales de interés, reducen la recuperación y la calidad del concentrado final. Casos de estudio de diversas compañías mineras han evidenciado el impacto negativo de la porosidad de los minerales NSG (Azañero y col., 2002; Elizondo-Alvarez y col., 2021; Tabatabaei y col., 2014). Por lo tanto, para favorecer el éxito de la flotación, es importante conocer las características de porosidad de los minerales NSG.



La adsorción de colector es un proceso clave para la flotación, el cual está relacionado significativamente con la estructura porosa de los minerales NSG. Sin embargo, la estructura porosa es compleja y presenta heterogeneidad particular de acuerdo con el tipo de mineral. Las tecnologías disponibles para determinar las características de la porosidad en minerales NSG se clasifican fundamentalmente en: inyección de fluidos, observación microscópica y espectroscopia. Estas tecnologías han contribuido a la caracterización de las estructuras porosas en diversos minerales y con ello se ha mejorado la comprensión de subprocesos como: la humectación, selectividad, la flotabilidad, etc. Del proceso de flotación frente al procesamiento de minerales NSG.

En el contexto anterior, el presente trabajo propone el desarrollo de una revisión bibliográfica que permita dimensionar la importancia de la porosidad de diversos minerales que comúnmente se procesan por flotación de espuma. La revisión se enfocará en ilustrar las redes estructurales de diversos minerales que forman poros, los cuales se medirán a través de una rutina de análisis de imágenes fácil de comprender y aplicar. La expectativa es que la metodología permita analizar con detalle la complejidad y la heterogeneidad de los poros. Por lo tanto, la presente revisión tiene como objetivo ilustrar las características y la importancia de las redes estructurales de diversas rocas y minerales que forman poros sobre los fundamentos de la flotación de espuma (e.g., adsorción de colector, humectación, hidrofobicidad, etc.).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó una revisión bibliográfica sobre minerales porosos (particularmente minerales ganga no sulfurosos, NSG) que se procesan en la flotación de minerales. La revisión permitió generar una base de imágenes (adquirida de la literatura) que ilustran las redes estructurales de diversos minerales que forman poros. La porosidad se determinó a través de una rutina de análisis de imágenes, que en particular se enfoca en la segmentación y cuantificación de áreas en una imagen en modo semiautomático. Posteriormente, la base de datos producto del análisis de imágenes se procesó para evaluar la distribución de tamaños de poros. Dada la naturaleza de estos datos (variable aleatoria continua) se utilizó la función de densidad (Montgomery y Runger,



1996) para describir la distribución de tamaños. Esto permitirá analizar detalladamente la distribución de los datos en un intervalo determinado (i.e., en una escala geométrica determinada).

Los resultados se presentarán en dos secciones, la primera denominada *demonstración* y una segunda que se reconoce como *aplicación*. En la sección de *demonstración* se desarrollará una discusión crítica sobre la congruencia entre la porosidad (determinada con análisis de imágenes) y los fundamentos fisicoquímicos de la flotación de espuma. En la sección de *aplicación* se utilizará la rutina de análisis de imágenes para analizar el papel de la porosidad en la flotación de partículas de carbón. Para este caso, se procesará la base de datos de Carrizales Méndez y col. (2021). La base de datos está compuesta por 3 set de imágenes, que ilustran la distribución de las partículas de carbón (y diversos minerales ganga) en las corrientes de alimentación, concentrado y colas de un banco de celdas industrial.

RUTINA DE ANÁLISIS DE IMÁGENES

Para evaluar la porosidad de los minerales NSG se propone la aplicación de un método de análisis de imágenes con el software Image-Pro Plus, el diagrama de flujo del método se ilustra en la Figura 1. En la Etapa 1 del proceso se define la relación entre el número de píxeles y las dimensiones reales de los objetos en la imagen (minerales, poros, grietas, etc.). Esto es posible por la medición de la longitud de la escala que se encuentra en la imagen. Una vez que se definió la calibración espacial de la imagen (e.g., 111 píxeles equivalen a $60\ \mu\text{m}$) inicia la Etapa 2 del proceso. Esta etapa permite aislar los poros, los cuales se definen como áreas de interés, esta acción se realiza a través de la "segmentación" como se ilustra en la Figura 1. Después de la segmentación, se favorece el contraste objeto/fondo y se facilita la detección de los poros. Posteriormente se dibuja el contorno

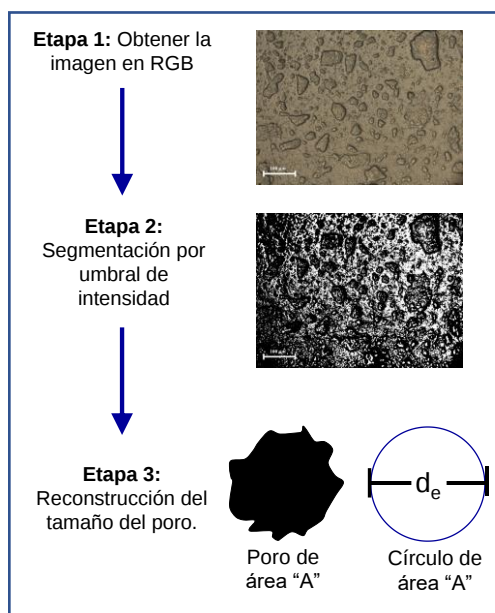


Figura 1. Análisis de imágenes.

del objeto y se define un polígono, el software realiza el cálculo del área (en pixeles) automáticamente, los datos se almacenan y quedan listos para su tratamiento posterior.

La Etapa 3 del proceso describe la reconstrucción del tamaño de poro, el cual es función del área "A" del objeto medido como se indica en la Ecuación 1.

$$d = 2 \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (1)$$

El procesamiento concluye con la definición de la escala geométrica de los poros, para efecto de estandarización se utilizará la clasificación IUPAC (microporo $<0.002 \mu\text{m}$; mesoporo $0.002-0.05 \mu\text{m}$; macroporo $>0.05 \mu\text{m}$).

RESULTADOS

DEMOSTRACIÓN

La Figura 2 permite demostrar el alcance y la sensibilidad de la rutina de análisis de imágenes propuesta. De acuerdo con la revisión bibliográfica sobre los minerales porosos y su influencia en la flotación se definieron cinco casos de estudio.

En cada caso de estudio se describen los fundamentos físicos y/o químicos relacionados con la

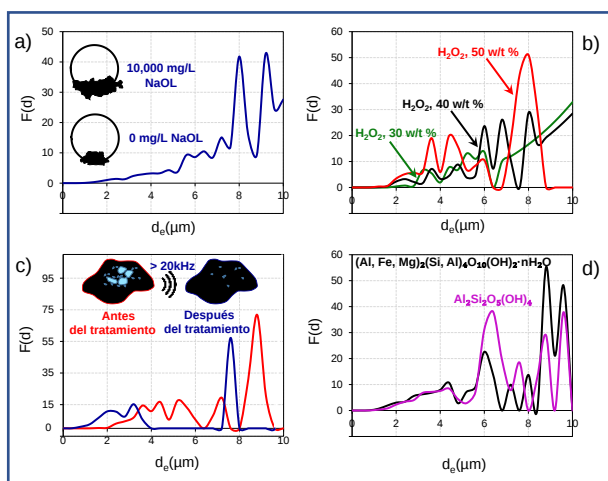


Figura 2. Redes estructurales de diversas rocas y minerales que forman poros; Caso de estudio 1(a), 2 (b), 3 (c) y 4 (d).



porosidad, la composición química/mineralógica de los minerales de estudio, la distribución del tamaño de poro y su influencia en la flotación de minerales.

El Caso de Estudio 1 (Xia y col., 2021) describe la relevancia de los minerales porosos durante el acondicionamiento químico de la pulpa (proceso previo a la flotación). El fundamento que describe el caso de estudio es la humectación de los poros. Xia y col. (2021) emplearon carbón activado, un material versátil y un excelente material de referencia para estudiar este subproceso de flotación. La composición química del carbón activado incluye C, H, O y N, en donde el contenido de C > 88%. Los resultados de la red estructural del carbono activado se muestran en la Figura 2a, los resultados indicaron la formación de macroporos (entre 1 y 10 μm). La función de densidad describe un comportamiento multimodal, sin embargo, en $d = 8 \mu\text{m}$ y $9 \mu\text{m}$ se observa la mayor concentración de poros medidos. Estos resultados permiten conjeturar que la flotabilidad del carbón activado presentará serias limitaciones (Mao, 2020). En el contexto anterior Xia y col. (2021) estudiaron la aplicación de oleato de sodio (NaOL) en el proceso de humectación de poros de carbón activo. A través de técnicas analíticas como ^1H LF-NMR y FTIR los autores reconocieron que altas concentraciones de NaOL retarda y/o previene el proceso de humectación, sobre todo en la escala de macroporos.

Los autores demostraron que el ángulo de contacto (máximo) incrementó de 86° a 108° (en un tiempo de humectación de 0 a 10 min.) para soluciones de 0 y 10,000 mg/L de NaOL, respectivamente. La solución con alta concentración NaOL mejoró significativamente la hidrofobicidad del carbón activado. La influencia de la concentración del reactivo también se refleja en los resultados de adhesión burbuja-partícula. Al respecto, la Figura 2a ilustra cualitativamente el tamaño del aglomerado en el tiempo 0 (min.) para la concentración de 0 y 10,000 mg/L de NaOL. Por lo tanto, el control sobre la humectación de los poros conduce al fortalecimiento y comprensión del proceso de flotación de materiales y/o minerales porosos.

El Caso de Estudio 2 (Chen y col., 2017) describe la importancia de los cambios en la estructura química y la morfología superficial que produce la oxidación del carbón de bajo rango. Los autores estudiaron las propiedades superficiales y su papel en la flotación; particularmente cambios en la estructura química y morfología superficial. Chen y col. (2017) deliberadamente oxidaron el carbón con una solución de H_2O_2 , el grado de oxidación quedó definido de acuerdo con la concentración de H_2O_2



aplicada. Las propiedades superficiales se analizaron a través de XPS (y otras técnicas como FTIR, BET y SEM) asimismo, se desarrollaron pruebas de flotación (asimismo, pruebas de tiempo de inducción y ángulo de contacto) para analizar la flotabilidad del carbón oxidado.

Los resultados de XPS indicaron que la composición química del carbón de bajo rango antes del proceso de oxidación es de C1s = 70.62 % (O1s = 23.17 %). Después de la oxidación con 30, 40 y 50 w/t % H₂O₂ la composición química cambió a C1s= 69.83 % (O1s=23.99 %), C1s= 68.99 % (O1s= 24.65 %) y C1s= 68.08 % (O1s= 25.46 %) respectivamente. Los resultados de los cambios que experimentan las redes estructurales se muestran en la Figura 2b. Los resultados indicaron la presencia de macroporos (entre 1 y 10 μ m) y la presencia de grietas que incrementan en el orden 30 w/t % < 40 w/t % < 50 w/t % H₂O₂ (longitud de las grietas incrementó de 140 a 285 μ m; ancho de las grietas incrementó de 2 a 16 μ m). La función de densidad describe un comportamiento multimodal, también se observa que a medida que incrementa el grado de oxidación la función de densidad indica que la porosidad incrementa (tanto en el tamaño como en el número de poros). Los autores concluyen que a medida que incrementa la oxidación la superficie de la partícula de carbón pierde grupos hidrofóbicos (i.e., C1s disminuye de 70.62 % a 68.08 %). Esta condición se refleja notablemente en la flotabilidad del carbón al observar que el ángulo de contacto disminuye de 99° (antes del proceso de oxidación) a 74°, 70° y 69° para 30, 40 y 50 w/t % H₂O₂, respectivamente. Asimismo, el rendimiento metalúrgico del proceso de flotación se ve limitado, la recuperación de combustible disminuye de 72 % (antes del proceso de oxidación) a < 10 % para todas las condiciones de oxidación que se experimentaron.

El Caso de Estudio 3 (Mao y col., 2019) describe la importancia de las arcillas en la flotación del carbón de bajo rango. El fenómeno describe que la superficie de los minerales arcillosos (que normalmente se presentan en tamaños ultrafinos < 10 μ m) tienen carga negativa natural, cuyo efecto al tener contacto con las partículas de carbón (>150 μ m) se fortalece la fuerza electroestática entre ellas (fuerzas de atracción). El resultado de esta interacción es la formación de una capa delgada de arcilla sobre la superficie de las partículas de carbón, alterando la textura, reduciendo la hidrofobicidad e intensificando la porosidad de las partículas de carbón. Al respecto, Mao y col. (2019) indican que la aplicación del ultrasonido, a través de la cavitación produce un efecto mecánico que representa una importante estrategia para mejorar el rendimiento de la flotación de carbón fino. El efecto mecánico



producido elimina la capa de arcilla e incluso la capa de óxido de la superficie del carbón. Esta acción permite restablecer las propiedades hidrofóbicas a la superficie de las partículas de carbón. Asimismo, la cavitación genera una gran cantidad de microburbujas que actúan como puente entre las partículas y las burbujas de aire del proceso (de flotación). Los resultados de la Figura 2c muestran que la red estructural de los minerales que forman poros cambia por efecto del ultrasonido, los resultados ilustran el antes y el después del tratamiento. En términos generales se reconoce la presencia de macroporos entre 1 y 10 μm . No obstante, después de la aplicación del ultrasonido en la red estructural se observa que la formación de poros disminuye considerablemente. Este cambio también se reconoce en la composición química de la superficie de las partículas de carbón a través de los resultados de XPS. Antes del tratamiento de ultrasonido C1s = 89.01 % (O1s = 8.83 %), después del tratamiento en un rango de frecuencia entre 20 y 40kHz la composición química cambió a C1s= 91.08 % (O1s=7.09 %). Estos cambios se relacionan con importantes fundamentos de la flotación como la hidrofobicidad y selectividad. Asimismo, se manifiestan en la operación en términos del consumo de reactivos de flotación y estabilidad de la zona de espuma.

El Caso de Estudio 4 (Jeldres y col., 2019) describe la importancia de las arcillas en la flotación de minerales de cobre, particularmente la caolinita y bentonita. Al respecto los resultados de la Figura 2d demuestran que estos minerales en sus redes estructurales forman macroporos en el rango de 1 a 10 μm . Para el caso de la bentonita se observa una cantidad considerable de poros en el rango de 8 a 10 μm . Mientras que la caolinita presenta su mayor presencia en el rango de 5 a 8 μm . En ambos casos se observa un comportamiento multimodal. La composición química de la bentonita se caracteriza por 63 wt. % de montmorillonita, 25 wt. % de albita y 12 wt. % de cuarzo. La caolinita por su parte se presenta en 85 wt. % con 4wt.% de cuarzo y 11wt. % moscovita. Jeldres y col. (2019) indican que los depósitos minerales con un alto contenido de arcilla, por ejemplo, la bentonita y/o caolinita representan un importante desafío para las operaciones de flotación. Un alto contenido de arcilla incrementa la viscosidad de la pulpa y la define como un fluido no newtoniano. Bajo esta condición disminuye la frecuencia de colisiones burbuja-partícula y la dispersión de las burbujas. La estrategia más común para enfrentar este reto es la adición de reactivos que modifican la reología de la pulpa, sin embargo, los costos de operación incrementan. Asimismo, las arcillas consumen colector y recubren la superficie del mineral valioso a través de un fenómeno conocido como efecto de recubrimiento



(equivalente al fenómeno que se presentó en el Caso de Estudio 3 de Mao y col. (2019)).

Otra preocupación importante es el arrastre de las arcillas a la corriente de concentrado, fenómeno que se conoce como arrastre de minerales ganga. Dado el tamaño ultrafino ($<30\mu\text{m}$) de las arcillas fácilmente son arrastradas por la película de fluido intersticial entre las burbujas de aire que forman la capa de espuma. En la flotación de cobre y plomo se ha observado que la recuperación de minerales ganga no metálica se ve notablemente influenciada por la presencia de arcillas.

APLICACIÓN

Caso de estudio 5. El trabajo de Carrizales Méndez y col. (2021) es un caso de estudio de la industria minero-metalúrgica del noreste de Coahuila. La investigación describe la problemática sobre la baja recuperación de un circuito de flotación. El estudio se realizó en la planta de preparación de carbón industrial del municipio de Múzquiz, Coahuila. La planta ha procesado carbón de minas locales durante los últimos treinta años. Sin embargo, una baja recuperación de carbón caracteriza el rendimiento del circuito de flotación, particularmente del banco de celdas primario con una recuperación $< 50\%$ ($\pm 5\%$).

Carrizales Méndez y col. (2021) revelaron que el bajo rendimiento metalúrgico del banco de celdas fundamentalmente se debe al tamaño de las partículas de carbón. Los autores reconocieron la presencia de partículas de carbón entre 3 y $67\mu\text{m}$ en las corrientes de alimentación, concentrado y colas del banco de celdas (para sistemas de flotación el tamaño de partícula óptimo oscila entre 50 y $250\mu\text{m}$). Asimismo, reportaron que las partículas en el concentrado son más grandes (media de $25\mu\text{m}$) en comparación con las partículas en la corriente de colas (media de $13\mu\text{m}$). Por lo tanto, debido al tamaño, las partículas de carbón que se procesan en el banco de celdas no desarrollan suficiente energía cinética para romper la película líquida y hacer contacto con las burbujas de aire (Wang, 2018). Esto significa que disminuyen las colisiones burbuja-partícula, en términos operacionales, este efecto se refleja en una baja recuperación. Carrizales Méndez y col. (2021) confirmaron esta observación y reconocieron que la recuperación del banco de celdas es del 51.02%. Un resultado que coincide con la tendencia histórica del circuito de flotación.



Sin embargo, después del procesamiento actual de la base de datos, se observa que en la superficie de las partículas de carbón las redes estructurales forman poros entre 5 y 10 μm en ambos productos (concentrado y colas), ver Figura 3. En promedio, los resultados indicaron que el tamaño de poro en las partículas del concentrado es 67 % menor en comparación con el tamaño de poro promedio en las partículas de la corriente de colas.

Otra diferencia notable es que, en el rango de 5 a 9.5 μm la cantidad de poros es sustancialmente mayor en la superficie de las partículas de colas. Por lo tanto, la flotabilidad de estas partículas se limita considerablemente por el efecto combinado del tamaño de partícula y de las redes estructurales que forman una gran cantidad de poros. Bajo esta condición la humectación es más intensa, entonces las partículas de carbón se hidratan y adquieren un carácter hidrófilo. Asimismo, no se descartan los efectos de otros factores como la oxidación y el recubrimiento (de la superficie de las partículas de carbón con partículas de minerales arcillosos).

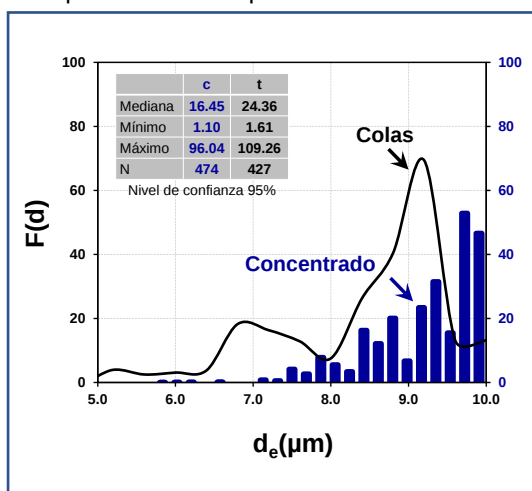


Figura 3. Redes estructurales que forman poros; partículas de carbón en la corriente de concentrado y colas del banco de celdas de flotación.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se desarrolló una revisión bibliográfica sobre la porosidad de diversos minerales y su importancia en la flotación de espuma. La revisión muestra y describe el impacto negativo de la porosidad en la flotación selectiva de minerales metálicos (e.g., CuFeS_2) y no metálicos (e.g., carbón). Asimismo, la revisión ofrece una visión general de las diversas estrategias técnicas que se han reportado en la literatura para disminuir y/o

controlar el efecto negativo de la porosidad en el contexto de la flotación de minerales.

Para fortalecer la revisión bibliográfica y profundizar en el análisis y discusión de la información se utilizó una rutina de análisis de imágenes. Con esta herramienta se logró desarrollar la discusión de cinco casos de estudio reportados en la literatura. El análisis de imágenes utilizado permitió fortalecer la comprensión de las alteraciones que ocurren en la superficie de las partículas y su relación con los fundamentos de la flotación de espuma (e.g., hidrofobicidad, flotabilidad, flotación verdadera, etc.).

REFERENCIAS

- Aksu, I., Bazilevskaya, E., & Karpyn, Z. T. (2015). Swelling of clay minerals in unconsolidated porous media and its impact on permeability. *GeoResJ*, 7: 1–13.
- Atrafi, A., Gomez, C. O., Finch, J. A., & Pawlik, M. (2012). Frothing behavior of aqueous solutions of oleic acid. *Minerals Engineering*, 36–38: 138–144.
- Azañero Ortiz, A., Núñez Jara, P., Figueroa Loli, A., León Delgado, E., Fernández Salinas, S., Orihuela Salazar, R., Caballero Ríos, M., Bazán Reyes, R., & Yi Choy Aragón, S. (2002). Flotación de minerales oxidados de plomo. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 5(10): 34-43. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v5i10.757>
- Azizi, A., Masdarian, M., Hassanzadeh, A., Bahri, Z., Niedoba, T., & Surowiak, A. (2020). Parametric Optimization in Rougher Flotation Performance of a Sulfidized Mixed Copper Ore. *Minerals*, 10(8): 660. <https://doi.org/10.3390/min10080660>
- Batjargal, K., Guven, O., Ozdemir, O., Karakashev, S. I., Grozev, N. A., Boylu, F., & Çelik, M. S. (2023). Frothing Performance of Frother-Collector Mixtures as Determined by Dynamic Foam Analyzer and Its Implications in Flotation. *Minerals*, 13(2): 242. <https://doi.org/10.3390/min13020242>
- Caballero Garduño, P. (2022). Estado del arte sobre la electroflotación en celda [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. <https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000823964/3/0823964.pdf>
- Carrizales-Méndez, Y. N., López-Saucedo, F., Rodríguez Vega, A., Carillo Pedroza, F. R., Beltrán Cruz, J. M., & Batista Rodríguez, J. A. (2021). Análisis de la distribución de partículas ultrafinas en la flotación de carbón y su relación con las variables metalúrgicas: recuperación y contenido de cenizas. *CienciAcierta*, 65(enero-marzo): 139–152.



- Caudillo-Landeros, K. A., Jimenez-Jacobo, A. T., Palafox-Rivas, L., Torres-Villanueva, I., Delgadillo-Castañón, X. Y., Corona-Arroyo, M., & Salazar-Hernández, M. (2023). Uso del potencial zeta en la caracterización de superficies de adsorbentes (MS-Nx-Fe). *Jóvenes en la Ciencia*, 21: 1–6. Recuperado a partir de <https://www.jovenesenla-ciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/3948>
- Chambi Huanca, L. M. (2020). Optimización del proceso de flotación para la mejora de la recuperación de minerales plomosos [Tesis, Universidad Nacional del Altiplano de Puno].
- Chen, S., Tang, L., Tao, X., Chen, L., Yang, Z., & Li, L. (2017). Effect of oxidation processing on the surface properties and floatability of Meizhiyou long-flame coal. *Fuel*, 210: 177–186. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.08.053>
- Cook, B. K., & Gibson, C. E. (2023). A review of fatty acid collectors: Implications for spodumene flotation. *Minerals*, 13(2): 212. <https://doi.org/10.3390/min13020212>
- Cordeiro, P. F. O., Oliveira, C. G., Paniago, L. N., Romagna, G., & Santos, R. V. (2018). The carbonate-hosted MVT Morro Agudo Zn-Pb deposit, central Brazil. *Ore Geology Reviews*, 101: 437–452. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.08.002>
- Elizondo-Álvarez, M. A., Uribe Salas, A., Bello Teodoro, S., & Alonso González, O. (2022). Comportamiento de flotación y mecanismos de interacción entre minerales sulfurados. *Epistemos*, 15(31): 22–30. <https://doi.org/10.36790/epistemos.v15i31.182>
- Elizondo-Álvarez, M. A., Uribe-Salas, A., & Bello-Teodoro, S. (2021). Chemical stability of xanthates under different environmental conditions. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 207: 111509.
- Elizondo-Álvarez, M. A., Uribe-Salas, A., & Nava-Alonso, F. (2020). Flotation studies of galena, cerussite, and anglesite. *Minerals Engineering*, 155: 106456.
- Foszcz, D., & Drzymała, J. (2011). Differentiation of organic carbon in Polish copper concentrates. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 47: 17–26.
- Gredelj, S., Zanin, M., & Grano, S. R. (2009). Selective flotation of carbon. *Minerals Engineering*, 22(3): 279–288. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.08.006>
- Hassanzadeh, A., Gholami, H., Özkan, S. G., Niedoba, T., & Surowiak, A. (2021). Effect of Power Ultrasound on Wettability and Collector-Less Floatability of Chalcopyrite, Pyrite and Quartz. *Minerals*, 11(1): 48. <https://doi.org/10.3390/min11010048>
- Hassanzadeh, A., Safari, M., Hoang, D. H., Khoshdast, H., Albijanic, B., & Kowalczyk, P. B. (2022). Technological assessments on recent developments in fine and coarse particle flotation systems. *Minerals Engineering*, 180: 107509. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107509>

- Huang, Z., Wang, G., Lei, Q., Liu, G., Fu, Y., Li, N., & Liu, J. (2022). Genetic Relationship between Mississippi Valley-Type Pb–Zn Mineralization and Hydrocarbon Accumulation in the Wusihe Deposits, Southwestern Margin of the Sichuan Basin, China. *Minerals*, 12(11): 1447. <https://doi.org/10.3390/min12111447>
- Izydorczyk, G., Mikula, K., Skrzypczak, D., Moustakas, K., Witek-Krowiak, A., & Chojnacka, K. (2021). Potential environmental pollution from copper metallurgy and methods of management. *Environmental Research*, 197: 111050. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111050>
- Jeldres, R. I., Uribe, L., Cisternas, L. A., Gutiérrez, L., Leiva, W. H., & Valenzuela, J. (2019). The effect of clay minerals on the flotation of copper ores: A critical review. *Applied Clay Science*, 170: 57–69. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.01.013>
- Kemp Cañón, A. (2018). Análisis crítico de las eficiencias en flotación [Tesis de maestría, Universidad de Chile].
- Konieczny, A., Pawlos, W., Krzeminska, M., Kaleta, R., & Kurzydło, P. (2013). Evaluation of organic carbon separation from copper ore by pre-flotation. *Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii. Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 49: 189-201. <https://doi.org/10.5277/ppmp130117>
- Krūmiņš, J., Kļaviņš, M., Ozola-Davidāne, R., & Ansone-Bērtiņa, L. (2022). Clay minerals for carbon capture. *Minerals*, 12(3): 349. <https://doi.org/10.3390/min12030349>
- Laskowski, J. S., & Yu, Z. (2000). Oil agglomeration of oxidized coals. *International Journal of Mineral Processing*, 58(1): 237–252.
- Liang, L., Tan, J., Li, B., & Xie, G. (2019). Reducing quartz entrainment in fine coal flotation by polyaluminum chloride. *Fuel*, 235: 150–157.
- Mao, Xia, W., Xie, G., & Peng, Y. (2019). Effects of pre-wetting time on surface topography and floatability of lignite particles. *Powder Technology*, 359. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.10.049>
- Mao, Z., Xia, W., Wang, D., & Yang, X. (2020a). Zero-conditioning flotation. *Minerals Engineering*, 152: 106366.
- Mao, Z., Xia, W., Wang, D., & Yang, X. (2020b). Wettability modification and its effect on lignite flotation. *Separation and Purification Technology*, 248: 117074.
- Mao, Y., Xia, W., Xie, G., & Peng, Y. (2020). Effects of pre-wetting time on surface topography and floatability of lignite particles. *Powder Technology*, 359: 1–7.
- Masdarian, M., Azizi, A., & Bahri, Z. (2020). Mechanochemical sulfidization in mixed sulfide-oxide copper ores. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 28(3): 743–748.

- Suárez, M., García-Rivas, J., Morales, J., Lorenzo, A., García-Vicente, A., & García-Romero, E. (2022). Review and new data on the surface properties of palygorskite: A comparative study. *Applied Clay Science*, 216: 106311. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2021.106311>
- Midekessa, G., Godakumara, K., Ord, J., Viil, J., Lättেকivi, F., Dissanayake, K., Kopanchuk, S., Rinken, A., Andronowska, A., Bhattacharjee, S., Rinken, T., & Fazeli, A. (2020). Zeta Potential of Extracellular Vesicles: Toward Understanding the Attributes that Determine Colloidal Stability. *ACS Omega*, 5(27): 16701-16710. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c01582>
- Molina Ballesteros, E., García Talegón, J., & Alonso Gavilán, G. (2009). Papel de la porosidad en el proceso de silicificación del borde occidental de la cuenca terciaria del Duero. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 22(3-4): 145-154.
- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (1996). *Applied statistics and probability for engineers*. Wiley.
- Pan, Z., Xiong, J., Cui, Y., Wei, Q., Jia, W., Zhang, Z., Jiao, F., & Qin, W. (2022). Effect mechanism of carbonaceous materials on the flotation separation of lead-zinc ore. *Separation and Purification Technology*, 294: 121101. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121101>
- Pugh, R., & Stenius, P. (1985). Solution chemistry and flotation of apatite. *International Journal of Mineral Processing*, 15(3): 193-218.
- Ran, J.-C., Qiu, X.-y., Hu, Z., Liu, Q.-J., Song, B.-X., & Yao, Y.-Q. (2019). Effects of particle size on flotation performance in the separation of copper, gold and lead. *Powder Technology*, 344: 654-664. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.12.045>
- Retamal, J. I., Robles, P. A., Quezada, G. R., & Jeldres, R. I. (2024). Molecular Design and Spodumene Flotation—A Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(6): 3227. <https://doi.org/10.3390/ijms25063227>
- Rosas Licon, P. M., Badillo Morales, A. G., Cerna Cortez, J. R., & Alatraste Bueno, V. G. S. (2024). Fisicoquímica de Superficies: la Ciencia de los Materiales Porosos. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(5): 7307-7324. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i5.14148
- Sánchez, F. G., Solís, R. P., Partida, E. G., & Camprubí, A. (2007). Estratigrafía del noreste de México y su relación con yacimientos estratoligados de fluorita, barita, celestina y Zn-Pb. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 59(1): 43-62.
- Shen, J., Xia, W., Mao, Z., Wang, D., & Yang, X. (2020). Effect of pore size on wetting. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 601: 124997.

- Shu, K., Xu, L., Wu, H., Peng, L., Xu, Y., Luo, L., Yang, J., & Tang, Z. (2020). In situ adsorption of mixed collectors BHA/DDA in spodumene-feldspar flotation system. *Separation and Purification Technology*, 251: 117325. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117325>
- Szmigiel, A., Apel, D.B., Skrzypkowski, K., Wojtecki, L. y Pu, Y. (2024). Avances en aprendizaje automático para un rendimiento óptimo en procesos de flotación: Una revisión. *Minerals*, 14 (4): 331. <https://doi.org/10.3390/min14040331>
- Tabatabaei, R. H., Nagaraj, D. R., Vianna, S. M. S. M., Napier-Munn, T. J., & Gorain, B. (2014). The effect of non-sulphide gangue minerals on the flotation of sulphide minerals from Carlin-type gold ores. *Minerals Engineering*, 60: 26-32. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.02.004>
- Uribe, R., Camillo, F., & Lascano, L. (2021). Minerales arcillosos: propiedades, clasificación y aplicaciones. *InfoANALÍTICA*, 9(2): 15–57. <https://doi.org/10.26807/ia.v9i2.202>
- Wang, G., Bai, X., Wu, C., Li, W., Liu, K., & Kiani, A. (2018). Recent advances in the beneficiation of ultrafine coal particles. *Fuel Processing Technology*, 178: 104–125.
- Xie, G. Mao, Y., Xia, W., & Peng, Y. (2022). Dynamic pore wetting and its effects on porous particle flotation: A review. *International Journal of Mining Science and Technology*, 32(6): 1365-1378. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2022.09.014>
- Xie, R., Zhu, Y., Liu, J., & Li, Y. (2021). Flotación y adsorción de un nuevo colector catiónico. *Separation and Purification Technology*, 264: 118445.
- Xing, Y., Gui, X., Karakas, F., & Cao, Y. (2017). Role of collectors and depressants in mineral flotation. *Minerals*, 7(11), 223. <https://doi.org/10.3390/min7110223>
- Zhang, H., Du, M., Hu, H., Zhang, H. y Song, N. (2024). Revisión del tratamiento ultrasónico en la flotación de minerales: Mecanismo y desarrollo reciente. *Molecules*, 29 (9): 1984. <https://doi.org/10.3390/molecules29091984>
- Zhu, Z., Yin, W., Wang, D., Sun, H., Chen, K., & Yang, B. (2020). The role of surface roughness in the wettability and floatability of quartz particles. *Applied Surface Science*, 527: 146799. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146799>

DEL LODO AL METAL

CÓMO EXTRAER ESTAÑO DE RESIDUOS DE ACERO DE FORMA SOSTENIBLE

FROM SLUDGE TO METAL

HOW TO SUSTAINABLY EXTRACT TIN FROM STEEL WASTE

RODRÍGUEZ TORRES, Isela Jocelín ¹

GONZÁLEZ DE LA CRUZ, José
Manuel¹

PUENTE SILLER, Damaris Margarita ²

FUENTES ACEITUNO, Juan Carlos ³

RESUMEN

La industria siderúrgica global enfrenta el desafío dual de gestionar sus residuos y asegurar el suministro de metales críticos. Los lodos y polvos de acería, considerados tradicionalmente un pasivo ambiental, contienen cantidades significativas de estaño, un metal cuya presencia es perjudicial para el acero reciclado, pero de alto valor estratégico. Este artículo revisa las rutas tecnológicas emergentes para la recuperación sostenible de estaño a partir de estos flujos de desecho, con especial énfasis en los procesos hidrometalúrgicos. Métodos como la lixiviación selectiva seguida de electro-obtención se presentan como alternativas prometedoras a la pirometalurgia convencional, debido a su menor consumo energético, mayor selectividad y potencial de integración en un modelo de economía circular. La implementación de estas tecnologías no solo mitiga el impacto ambiental de los residuos, sino que también contribuye a una cadena de suministro de estaño más resiliente y circular.

Palabras clave: estaño; metalurgia sostenible; economía circular; lixiviación; electrodeposición.

ABSTRACT

The global steel industry faces the dual challenge of managing its waste and securing the supply of critical metals. Steelmaking sludges and dusts, traditionally considered an environmental liability, contain significant amounts of tin, a metal whose presence is detrimental to recycled steel but of high strategic value. This article reviews emerging

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

2. Instituto Tecnológico
Superior de Monclova,
Tecnológico Nacional de
México, Monclova,
Coahuila, México.

3. Centro de Investigación y de
Estudios Avanzados del Instituto
Politécnico Nacional, Unidad
Saltillo, Ramos Arizpe, Coahuila,
México.

Correspondencia
rodriguezisela@uadec.edu.mx
<https://orcid.org/0009-0003-6455-8249>

Fecha de recepción
13 de noviembre de 2025.

Fecha de aceptación
12 de febrero de 2025.

technological routes for the sustainable recovery of tin from these waste streams, with special emphasis on hydrometallurgical processes. Methods such as selective leaching followed by electrowinning are presented as promising alternatives to conventional pyrometallurgy, due to their lower energy consumption, higher selectivity, and potential for integration into a circular economy model. The implementation of these technologies not only mitigates the environmental impact of waste but also contributes to a more resilient and circular tin supply chain.

Keywords: tin; sustainable metallurgy; circular economy; leaching; electrodeposition.

INTRODUCCIÓN

El estaño (Sn) constituye un elemento metálico estratégico que presenta una paradoja fundamental en la industria moderna: mientras su demanda crece en aplicaciones tecnológicas avanzadas, su presencia como impureza en procesos de reciclaje siderúrgico genera desafíos técnicos significativos. Esta dualidad se acentúa en el contexto de la economía circular, donde la recuperación eficiente de estaño desde residuos industriales emerge como una necesidad tanto ambiental como económica (European Commission, 2023). La Figura 1, muestra una imagen correspondiente al mineral de estaño, la cual ha sido reportada por el Servicio Geológico Mexicano en 2024.



Figura 1. Representación del mineral de Estaño. (Servicio Geológico Mexicano 2024).

El estaño es un metal estratégico con aplicaciones industriales muy diversas que lo convierten en un recurso de alto valor económico y tecnológico. Se utiliza ampliamente en la fabricación de soldaduras para la electrónica y la microelectrónica, debido a su baja toxicidad relativa y excelente conductividad eléctrica (Miyao & Ohno, 2020).

Además, se aplica en revestimientos anticorrosivos, aleaciones de bronce y latón, y en componentes de baterías de alto rendimiento, lo que refuerza su papel en sectores emergentes como las energías renovables y la movilidad eléctrica (Zhang y col., 2022). La recuperación de estaño a partir de residuos de acero, como lodos o escorias, ofrece ventajas ambientales y económicas significativas. En primer lugar, reduce la necesidad de minería primaria, disminuyendo la degradación del suelo, la emisión de gases de efecto invernadero y el consumo de energía asociado a la extracción convencional (Kumar y col., 2021). En segundo lugar, la obtención de estaño como recurso secundario contribuye a una gestión más sostenible de residuos industriales, minimizando su volumen y toxicidad en vertederos y promoviendo una economía circular dentro de la industria siderúrgica (Singh & Mehra, 2019).

Finalmente, la reutilización de estaño recuperado en procesos industriales puede disminuir la dependencia de proveedores externos y mitigar la volatilidad de precios internacionales, fortaleciendo la seguridad de suministro y competitividad de las cadenas productivas (OECD, 2023).

La industria siderúrgica constituye un pilar fundamental de la economía global, con una producción que superó los 1,85 mil millones de toneladas métricas en 2023 (World Steel Association, 2024). Sin embargo, esta actividad industrial genera significativos volúmenes de residuos que representan un creciente desafío ambiental. Entre estos subproductos, los lodos de acería emergen como un material particularmente problemático debido a su composición compleja y potencial de contaminación.

Los lodos se producen principalmente en los sistemas de tratamiento de aguas residuales de las acerías, donde capturan partículas finas y compuestos metálicos provenientes de los procesos de producción. Según estimaciones recientes, por cada tonelada de acero producida mediante horno de oxígeno básico (BOF) se generan entre 8-12 kg de lodos, mientras que en la ruta del horno de arco eléctrico (EAF) esta cifra oscila entre 15-25 kg (Zhang y col., 2022).

La composición química de estos lodos refleja la naturaleza de las materias primas utilizadas, mostrando variaciones significativas entre instalaciones. No obstante, su perfil típico incluye:



Tabla 1. Composición química de lodos producidos por la industria siderúrgica (Zhang y col., 2022).

	Fórmula química	%
Óxidos de hierro	Fe_2O_3	40-60%
Calcio	CaO	5-15%
Zinc	Zn	0.5-5%
Estaño	Sn	0.1-2%
Plomo	Pb	0.1-1%
Sílice	SiO_2	2-8%

La presencia de metales potencialmente tóxicos, incluidos zinc, plomo y estaño, clasifica a estos lodos como residuos peligrosos en numerosas jurisdicciones (Salihoglu, 2008). Su disposición en vertederos especializados implica costos considerables y riesgos de lixiviación a largo plazo, generando pasivos ambientales persistentes.

Paradójicamente, esta problemática encierra una oportunidad estratégica. El contenido de metales no ferrosos, particularmente el estaño, representa un recurso valorizable en el contexto de la economía circular. El estaño, clasificado como metal crítico por la Unión Europea (Comisión Europea, 2023), alcanza concentraciones económicamente atractivas en estos residuos, variando entre 0.3-1.5 % en lodos de BOF y 0.2-0.8 % en aquellos provenientes de EAF.

METODOLOGÍA

Este artículo se desarrolla como una revisión sistemática narrativa de la literatura científica y técnica reciente, centrada en los procesos de extracción y recuperación de estaño a partir de residuos de la industria del acero, como los lodos y polvos de horno de arco eléctrico. El objetivo es cartografiar el panorama actual de las tecnologías disponibles, identificando y contrastando

las técnicas convencionales con los enfoques innovadores y emergentes. Se realiza una evaluación crítica de cada método, analizando su eficiencia de recuperación, su viabilidad económica y, fundamentalmente, su alineación con los principios de la economía circular y la química verde con el fin de destacar las rutas más sostenibles.

CLASIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS MÉTODOS

Los métodos identificados se clasificaron en dos grandes categorías: pirometalurgia e hidrometalurgia, con una subclasificación en convencionales y emergentes/verdes. El análisis se centró en extraer datos de la literatura científica sobre:

- Eficiencia de extracción: porcentaje de Sn recuperado del residuo.
- Condiciones operativas: temperatura, pH, concentración de reactivos.
- Consumo energético: estimación cualitativa (alto/medio/bajo).
- Impacto ambiental: naturaleza y toxicidad de los insumos y efluentes.
- Nivel de madurez tecnológica (TRL): Escala de laboratorio (TRL 1-4), piloto (TRL 5-7) o industrial (TRL 8-9).

Tipos de métodos y sus aplicaciones

El análisis de la literatura permitió identificar y caracterizar las siguientes técnicas, cuyas aplicaciones prácticas son cruciales para el reciclaje de estaño.

1.1 Métodos pirometalúrgicos

La transformación de residuos que contienen estaño mediante procesos térmicos constituye un enfoque tradicional. Estas técnicas, aunque tecnológicamente maduras, presentan importantes retos ambientales debido a las altas temperaturas requeridas y a la generación de emisiones gaseosas.

- Fumación o volatilización: consiste en calentar los residuos (p. ej., lodos de acería) a temperaturas superiores a 1200 °C en un ambiente reductor, lo que volatiliza los óxidos de estaño para luego condensarlos y obtener un concentrado. Su aplicación principal es el tratamiento inicial de residuos de baja ley. Sin embargo, el alto consumo energético y la necesidad de controlar las emisiones de polvo representan un costo operativo y ambiental significativo (Pickles y col., 2020; Guzman y col., 2022).

- Reducción carbotérmica: Involucra la fundición del residuo con un agente reductor como el coque a altas temperaturas para reducir los óxidos de estaño a metal. Se aplica para la producción directa de estaño metálico o aleaciones, pero es intensiva en energía y genera escorias y emisiones de CO_2 .

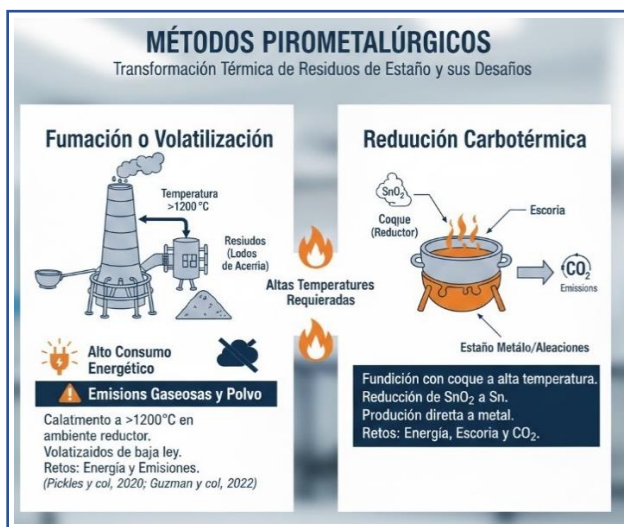


Figura 2. Esquema de Métodos Pirometalúrgicos para la Recuperación de Estaño: Procesos y Consideraciones Ambientales.

1.2 Métodos hidrometalúrgicos

Dentro de las alternativas a los procesos térmicos, los métodos hidrometalúrgicos han ganado relevancia por su potencial para reducir el impacto ambiental. A continuación, se detallan los principales enfoques identificados, con énfasis en lixiviantes sostenibles.

Tabla 2. Evaluación de lixiviantes alternativos y sostenibles para la extracción de estaño.

Referencias	Método (lixiviante)	Mecanismo/ condiciones	Aplicación y eficiencia	Sostenibilidad y limitaciones
(Li y col., 2021; Tanvar & Dhawan, 2022).	Ácido cítrico	Forma complejos solubles con Sn en condiciones suaves (pH ácido, T medio).	Ideal para procesos de bajo impacto ambiental.	Ventaja: Biodegradable, baja toxicidad. Limitación: Cinética más lenta.
(Ahtiainen y col., 2020; Zhang y col., 2023).	Tiosulfato ($S_2O_3^{2-}$)	Forma complejos con Sn, usualmente con Cu^{2+} como oxidante/catalizador.	Alto potencial para residuos electrónicos; alta selectividad	Ventaja: Alternativa no tóxica al cianuro. Limitación: Solución inestable, alto consumo de reactivos.
(Petrus y col., 2021; Bevers y col., 2024).	Tiocianato (SCN^-)	Forma complejos estables de tiocianato de estaño en medio ácido.	Extracción eficiente de fuentes secundarias complejas.	Ventaja: Alta eficiencia y selectividad. Limitación: Toxicidad y corrosividad del lixivante

MÉTODOS DE PURIFICACIÓN Y REFINACIÓN

Una vez obtenidas las soluciones enriquecidas con estaño mediante los procesos de lixiviación, es necesario implementar técnicas eficaces para aislar y purificar el metal.

- **Precipitación por cementación:** Utiliza polvo de aluminio o zinc para desplazar y precipitar el estaño de sus soluciones lixiviadas. Es una técnica simple y de bajo costo, ampliamente aplicada en la industria, pero el estaño producido (cemento) suele requerir una refinación posterior debido a su baja pureza.
- **Electro-obtención (EO):** Técnica electroquímica clave para producir estaño metálico de alta pureza (>99.5 %) directamente desde la solución lixiviada y purificada. Los fundamentos de estos procesos convencionales han sido ampliamente documentados. Las aplicaciones de vanguardia buscan optimizar los electrolitos para mejorar la eficiencia energética y la morfología del depósito, utilizando sistemas más benignos que los electrolitos ácidos tradicionales (Zhang, B. y col., 2024).



Figura 3. Métodos de Purificación y Refinación de Estaño: De la Solución al Metal Puro.

MÉTODOS DE APOYO Y CARACTERIZACIÓN

Para complementar y optimizar los procesos de extracción y refinación, se han desarrollado diversas metodologías de análisis y caracterización.

- **Análisis de ciclo de vida (ACV):** No es un método de extracción, pero es una herramienta analítica crítica. Se aplica para cuantificar y comparar el impacto ambiental total de las diferentes rutas tecnológicas, desde el residuo hasta el metal final, proporcionando una base objetiva para la toma de decisiones hacia la sostenibilidad (Guzman y col., 2022).
- **Técnicas de caracterización:** El uso de microscopía electrónica de barrido (SEM), difracción de rayos X (XRD) y espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS) es fundamental para comprender los mecanismos de lixiviación, la morfología de los productos y las propiedades superficiales de los residuos y productos intermedios, guiando la optimización de los procesos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis sistemático de la literatura revela un panorama tecnológico en evolución para la recuperación de estaño a partir de residuos de acería, caracterizado por una clara dicotomía entre los métodos establecidos y las alternativas emergentes. Los resultados se presentan y discuten en función de las categorías metodológicas analizadas.

EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LAS RUTAS PRINCIPALES

Pirometalurgia vs. Hidrometalurgia

La comparación entre las rutas pirometalúrgicas e hidrometalúrgicas pone de manifiesto una compensación fundamental entre la madurez tecnológica y la sostenibilidad ambiental.

Los métodos pirometalúrgicos, como la fumación y la reducción carbotérmica, demuestran una alta eficiencia en la recuperación de estaño y su implementación a escala industrial está consolidada (TRL 8-9). Sin embargo, los resultados confirman que esta eficacia tiene un costo ambiental significativo. El consumo energético es inherentemente alto debido a las temperaturas que superan los 1200 °C, y los procesos generan inevitablemente emisiones gaseosas y residuos sólidos como escorias, que requieren una gestión y disposición final cuidadosa (Pickles y col., 2020; Guzman y col., 2022). Esta ruta, aunque robusta, se contrapone a los principios de la economía circular al ser intensiva en recursos y generadora de nuevos flujos de residuos.

En contraste, la hidrometalurgia emerge como una familia de técnicas con un perfil de sostenibilidad inherentemente más favorable. Su principal ventaja radica en la capacidad de operar a temperaturas cercanas a temperatura ambiente, lo que se traduce en un consumo energético significativamente menor. Además, permiten un control más preciso sobre el proceso, facilitando la separación selectiva del estaño de la matriz de óxido de hierro, lo que es técnicamente complejo mediante rutas térmicas. No obstante, el análisis revela que la mayoría de estas técnicas se encuentran en etapas de desarrollo menos maduras (TRL 4-7), y su viabilidad económica a gran escala aún debe ser demostrada de manera más contundente (Ahtiainen y col., 2020; Li y col., 2021).



EL POTENCIAL DE LOS LIXIVIANTE VERDES PARA UNA RECUPERACIÓN SOSTENIBLE

Dentro del ámbito hidrometalúrgico, los resultados destacan el notable potencial de los agentes lixiviantes no convencionales, como el ácido cítrico, el tiosulfato y el tiocianato, para redefinir la sostenibilidad en la recuperación de metales.

El ácido cítrico se posiciona como un agente particularmente prometedor debido a su naturaleza biodegradable y baja toxicidad. Los estudios revisados, como el de (Li y col., 2021), reportan eficiencias de lixiviación notables bajo condiciones operativas suaves. La discusión en torno a este método se centra en su mecanismo de acción, donde el ácido cítrico actúa no solo como un acidificante, sino también como un agente complejante, formando complejos estables con los iones de estaño que favorecen su disolución. La principal limitación, una cinética más lenta en comparación con los ácidos minerales, abre una línea de investigación crucial para la optimización del proceso mediante catalizadores o la aplicación de ultrasonido.

Por otro lado, el tiosulfato se consolida como la alternativa más viable y ampliamente investigada para reemplazar a los lixiviantes cianurados en el tratamiento de residuos electrónicos. Su principal ventaja, confirmada en los resultados, es su baja toxicidad y su alta selectividad. Sin embargo, la discusión debe enfatizar el desafío de la estabilidad de la solución de tiosulfato, la cual puede sufrir descomposición termodinámica, generando un alto consumo de reactivos y a la formación de productos de descomposición que pueden interferir en la lixiviación y las etapas posteriores (Zhang y col., 2023). La adición de iones cúpricos como catalizador oxidante es una estrategia común, pero introduce la complejidad de gestionar otro metal en el circuito.

El tiocianato, aunque menos explorado, muestra una alta eficiencia en la formación de complejos muy estables con el estaño. La discusión aquí debe ser cautelosa; a pesar de su efectividad, la toxicidad inherente del ion tiocianato representa un riesgo ambiental y ocupacional que no puede ser subestimado (Bever y col., 2024). Su aplicación probablemente estaría condicionada a sistemas de circuito cerrado con una gestión rigurosa de los efluentes, lo que podría incrementar los costos de operación y limitar su

atractivo como una opción "verde" en comparación con el ácido cítrico o el tiosulfato.

INTEGRACIÓN DE PROCESOS Y EVALUACIÓN DEL CICLO DE VIDA

La discusión no estaría completa sin considerar la integración de las etapas de lixiviación y refinación. Los resultados indican que la electro-obtención (EO) es la técnica de purificación más adecuada para acoplarse a los lixiviantes verdes, ya que permite la producción directa de metal de alta pureza a partir de las soluciones lixiviadas. Los avances recientes se orientan a la formulación de electrolitos más benignos, que mejoren la eficiencia energética y la morfología del depósito de estaño, superando los inconvenientes de los electrolitos ácidos tradicionales (Zhang, B. y col., 2024).

Finalmente, la herramienta del Análisis del Ciclo de Vida (ACV) proporciona el marco objetivo para esta discusión. El estudio de Guzman y col. (2022) es ilustrativo, ya que cuantifica cómo, a pesar de una posible menor eficiencia en algunas rutas hidrometalúrgicas, su perfil ambiental general —especialmente en términos de huella de carbono y potencial de eutrofización— puede ser significativamente mejor que el de las rutas pirometalúrgicas. Esto subraya que la "sostenibilidad" no es una métrica unidimensional (la eficiencia de recuperación), sino un balance multivariable que incluye el consumo de energía, la generación de residuos y la toxicidad de los insumos.

CONCLUSIONES

Este análisis pone en evidencia que la transición hacia una recuperación sostenible de estaño a partir de residuos de acería es técnicamente viable, con la hidrometalurgia emergiendo como la ruta más prometedora. Frente a los métodos pirometalúrgicos, intensivos en energía y generadores de significativos impactos ambientales, los procesos hidrometalúrgicos, especialmente aquellos que emplean lixiviantes verdes como el ácido cítrico y el tiosulfato, ofrecen un perfil de sostenibilidad notablemente mejorado. Estos

agentes permiten la lixiviación selectiva del estaño en condiciones operativas suaves (como temperaturas cercanas al ambiente, presiones atmosféricas y concentraciones moderadas de reactivo), minimizando la generación de emisiones tóxicas y alineándose con los principios de la química verde y la economía circular. Sin embargo, debido a que la madurez tecnológica de estas alternativas aún es limitada, y su escalamiento industrial enfrenta el desafío dual de optimizar la cinética de reacción y demostrar su viabilidad económica en un contexto competitivo, es importante el desarrollo de investigaciones que generen conocimiento sobre el aprovechamiento de residuos industriales que contengan estaño.

TENDENCIAS FUTURAS

Con base en los hallazgos de esta revisión, se identifican varias líneas de investigación y desarrollo cruciales para el futuro del sector:

1. Optimización y sinergia de lixiviantes: Se prevé una investigación intensiva dirigida a superar las limitaciones de los lixiviantes verdes. Esto incluye el desarrollo de coadyuvantes o catalizadores para acelerar la cinética del ácido cítrico y la formulación de estabilizadores para prevenir la descomposición del tiosulfato. Una tendencia clave será el diseño de sistemas lixiviantes mixtos o en etapas que combinen las ventajas de varios reactivos (por ejemplo, un pre-tratamiento con un ácido orgánico suave seguido de una lixiviación con tiosulfato) para maximizar la eficiencia y selectividad.
2. Avances en la purificación sostenible: La integración eficiente de la etapa de refinación es fundamental. Las investigaciones futuras se centrarán en el desarrollo de electrolitos avanzados para la electro-obtención que sean no corrosivos, de alta conductividad y que permitan la deposición de estaño con una morfología uniforme y alta pureza, minimizando el consumo energético. La exploración de técnicas alternativas, como la precipitación selectiva con ligandos verdes o la separación por membranas, también ganará relevancia.
3. Intensificación de procesos y digitalización: La aplicación de tecnologías de intensificación de procesos, como la lixiviación asistida por microondas o ultrasonido, podría revolucionar la cinética de extracción, reduciendo drásticamente los tiempos de reacción y el consumo de reactivos. Paralelamente, la implementación de herramientas de modelado digital machine learning y análisis de big

data permitirá optimizar los parámetros operativos, predecir el comportamiento de los residuos y diseñar plantas de reciclaje más eficientes y adaptables. Enfoque en la economía circular integral: El futuro no reside únicamente en extraer estaño, sino en valorizar todos los componentes del residuo. Las tendencias apuntan hacia el diseño de procesos de "cero residuos" o "biorrefinerías de residuos", donde, después de la extracción del estaño, la matriz de óxido de hierro restante sea aprovechada en la fabricación de cementos, cerámicas o como pigmento, cerrando completamente el ciclo de los materiales.

4. Desarrollo de marcos normativos e incentivos: La transición a gran escala requerirá de políticas públicas que incentiven la valorización de residuos sobre su disposición final. La futura legislación, basada en evidencia científica como la generada por los Análisis de Ciclo de Vida, podría incluir impuestos a las emisiones de carbono o créditos verdes para aquellos productores que implementen tecnologías de recuperación sostenible, acelerando la adopción industrial de estas prácticas.

En definitiva, el camino "del lodo al metal" está siendo redefinido por la innovación científica. La tendencia futura es clara: se transita desde procesos lineales de alto impacto hacia sistemas circulares, inteligentes y ambientalmente responsables, donde la recuperación de metales como el estaño se convierte en un pilar fundamental de una industria metalúrgica sostenible.

AGRADECIMIENTOS

Isela Jocelín Rodríguez Torres desea expresar su agradecimiento a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación de México (SECIHTI) y a la Universidad Autónoma de Coahuila por el respaldo financiero e institucional recibido para la elaboración de este artículo de revisión, que es parte de su proyecto de investigación sobre la recuperación de metales valiosos a partir de residuos industriales mediante técnicas hidrometalúrgicas sostenibles.



CienciAcierta

REFERENCIAS

- Ahtiainen, R., Lundström, M., & Liipo, J. (2020). Tin leaching from printed circuit boards using ammoniacal thiosulfate solutions. *Minerals Engineering*, 145: 106070. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106070>
- Beyers, S., Van Petegem, S., & Spooren, J. (2024). Thiocyanate leaching of critical metals from secondary sources: A review. *Hydrometallurgy*, 225: 106265. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2024.106265>
- European Commission. (2023). Study on the critical raw materials for the EU – 2023 final report. Publications Office of the European Union. https://single-market-economy.ec.europa.eu/publications/study-critical-raw-materials-eu-2023-final-report_en
- Euroslag. (2022). Status and prospects of iron and steel slag application in Europe. <https://www.euroslag.com/publications/>
- Guzman, S., Morales, A., & Torres, R. (2022). Life cycle assessment of pyrometallurgical and hydrometallurgical tin recovery from steelmaking wastes. *Resources, Conservation and Recycling*, 176: 105945. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105945>
- Kumar, R., Patel, A., & Singh, D. (2021). Recovery of tin from steel scrap and industrial waste: Environmental and economic perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 290: 125790.
- Li, J., Gao, L., & Wang, H. (2021). Leaching of tin from steel waste using oxalic acid and hydrogen peroxide: Mechanism and kinetics. *Hydrometallurgy*, 205: 105720. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105720>
- Miyao, S., & Ohno, M. (2020). Applications of tin and tin alloys in electronic packaging and soldering technologies. *Journal of Materials Science and Engineering*, 12(3): 145–159.
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2023). Global outlook on critical raw materials: Resilience through diversification. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/12345678-en>
- Petrus, H. T. B. M., Setiawan, A., & Perdana, I. (2021). Tin extraction from electronic waste using acidic thiocyanate leachant. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1143(1): 012033. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1143/1/012033>
- Pickles, C. A., Marzoughi, T., & Akbar Rhamdhani, M. (2020). Thermodynamic analysis of the vaporization of tin from electric arc furnace dust. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 51(2): 589–603. <https://doi.org/10.1007/s11663-020-01785-0>

- Secretariat of the Basel Convention. (2014). Guidance on environmentally sound management of wastes consisting of, containing or contaminated with metals. United Nations Environment Programme. <https://www.basel.int/>
- Servicio Geológico Mexicano. (s. f.). Estano. México Minero. Recuperado el 22 de mayo de 2024, de <https://mexicomintero.org/tipos-de-minerales/estano-nuevo/>
- Singh, P., & Mehra, A. (2019). Secondary resources for critical metals: A review of sustainable recovery practices. *Environmental Technology Reviews*, 8(1): 37–54.
- Tanvar, H., & Dhawan, N. (2022). Alkaline leaching of tin from waste steelmaking dust for its recovery as nano-SnO₂. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3): 107567. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107567>
- World Steel Association. (2024). World steel in figures 2024. <https://worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/World-Steel-in-Figures/>
- Zhang, B., Chen, Y., & Li, W. (2024). Eco-friendly electrodeposition of high-purity tin from a sulfuric acid system with non-toxic additives. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 952: 117987. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2023.117987>
- Zhang, B., Wang, J., & Li, Z. (2022). Comprehensive characterization and strategic utilization of steelmaking sludges. *Journal of Cleaner Production*, 345: 131128. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131128>
- Zhang, X., Li, Y., & Chen, J. (2022). Sustainable sourcing and applications of tin: Advances and challenges. *Resources, Conservation and Recycling*, 178: 105952.
- Zhang, Y., Li, H., & Wang, C. (2023). Sustainable recovery of tin from waste printed circuit boards using choline chloride-based deep eutectic solvents. *Waste Management*, 157: 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.11.040>

RETOS ACTUALES Y FUTUROS PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR

CURRENT AND FUTURE CHALLENGES FOR THE UTILIZATION OF SOLAR ENERGY

GONZÁLEZ CALVILLO, Jesús Rodolfo

AGUILERA GONZÁLEZ, Elsa Nadia

RESUMEN

El uso extensivo de combustibles fósiles ha generado impactos ambientales significativos, lo que ha impulsado la búsqueda de fuentes de energía alternativas capaces de sustituirlos. Entre éstas, la energía solar ha surgido como una opción particularmente prometedora. En este estudio, se realizó una revisión de la literatura para evaluar el aprovechamiento de la energía solar como fuente limpia, así como los desafíos asociados a su implementación. Los diferentes tipos de energía solar y sus capacidades actuales fueron examinados de manera sistemática. Asimismo, se realizó un análisis de los principales desafíos y complejidades relacionados con su implementación a gran escala en aplicaciones cotidianas.

Palabras clave: energía solar; celdas solares; energía sustentable.

Facultad de Ciencias Químicas,
Universidad Autónoma de
Coahuila, Saltillo, Coahuila,
México.

ABSTRACT

The extensive use of fossil fuels has led to significant environmental impacts, thereby driving the search for alternative energy sources to replace them. Among these, solar energy has emerged as a particularly promising option. In this study, a comprehensive literature review was conducted to evaluate the use of solar energy as a clean energy source and the challenges associated with its implementation. The different types of solar energy and their current capacities were systematically examined. Furthermore, the principal challenges and complexities related to its large-scale deployment in everyday applications were analyzed.

Keywords: solar energy; solar cells; sustainable energy

Correspondencia
elsaaguilera@uadec.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0002-6289-5992>
Fecha de recepción
19 de noviembre de 2025.
Fecha de aceptación
17 de febrero de 2026.

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de energía mundial y la necesidad urgente de mitigar el cambio climático han impulsado una transición hacia fuentes de energía renovables. En este contexto, la energía solar se ha posicionado como una de las alternativas más prometedoras debido a su abundancia, su amplia distribución geográfica y su bajo impacto ambiental durante su operación (International Energy Agency [IEA], 2023; Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2022). En las últimas décadas, los avances en tecnologías fotovoltaicas y termosolares han permitido una reducción significativa de los costos y un incremento sostenido de la capacidad instalada a nivel global (IEA, 2023).

No obstante, a pesar de su rápido crecimiento, el aprovechamiento eficiente y sostenible de la energía solar enfrenta diversos retos. Desde el punto de vista tecnológico, persisten limitaciones asociadas a la eficiencia, la estabilidad y la degradación de los materiales, así como a la disponibilidad de materias primas críticas (Green y col., 2022). Además, la intermitencia inherente a la radiación solar plantea desafíos para su integración en redes eléctricas convencionales y subraya la necesidad de soluciones de almacenamiento de energía a gran escala (Lund y col., 2015). Por otra parte, estudios recientes destacan la importancia de evaluar el impacto ambiental de los sistemas solares a lo largo de su ciclo de vida, incluyendo la fabricación y el reciclaje de módulos (Jordan - Kurtz, 2013).

Dado el crecimiento exponencial de la literatura en este campo, resulta pertinente realizar una revisión bibliográfica que sintetice los principales avances y desafíos actuales. El presente artículo analiza los retos sociales, económicos, políticos, técnicos y ambientales del aprovechamiento de la energía solar, e identifica líneas de investigación prioritarias para su desarrollo futuro.

ENERGÍA SOLAR

La energía solar para la generación de electricidad ha cobrado especial interés por sus ventajas y características únicas. El uso del sol como motor

energético es una fuente ilimitada, accesible en la mayoría de las regiones y que no genera subproductos en su aprovechamiento.

Existen dos metodologías principales para la conversión de la radiación solar en electricidad: la energía solar fotovoltaica (FV) y la energía termosolar (o energía solar térmica de concentración) (Kumar Dalapati y col., 2023). Aunque ambas comparten la misma fuente primaria, sus principios operativos difieren significativamente. Mientras que la tecnología fotovoltaica utiliza el efecto fotoeléctrico, la energía termosolar opera de manera análoga a las centrales convencionales; es decir, aprovecha el calor del sol para alimentar un ciclo termodinámico que, mediante el movimiento de turbinas, produce energía eléctrica (Müller-Steinhagen y Trieb, 2004).

La energía termosolar consiste en el aprovechamiento de la radiación solar mediante sistemas de calentamiento que utilizan espejos o dispositivos de concentración (Figura 1), llamados heliostatos, que concentran los rayos del sol para calentar un fluido, generalmente agua o sales fundidas (Mahmoud y col., 2026). El calentamiento de este fluido permite generar vapor de agua, que impulsa turbinas conectadas a un generador eléctrico. En este proceso, el movimiento, del rotor dentro del generador produce electricidad por inducción electromagnética. Entre las ventajas de la energía termosolar se encuentra la posibilidad de seguir generando electricidad incluso después de la puesta del sol. Esta característica representa una ventaja frente a los sistemas fotovoltaicos, cuya operación depende directamente de la radiación solar.

En este sentido, el principio de conversión energética de la energía termosolar es análogo al empleado en la mayoría de las plantas energéticas tradicionales. Las principales limitaciones de esta tecnología se relacionan con la eficiencia en la captación y concentración de la radiación solar. Debido a esto, las plantas termosolares suelen desarrollarse a gran escala y se implementan principalmente como plantas energéticas estatales o industriales. Países como España y Estados Unidos han adoptado esta tecnología, aprovechando las regiones desérticas con alta irradiación solar para instalar plantas termosolares. Por otro lado, China se ha consolidado como uno de los países con mayor inversión en energías renovables a nivel mundial, lo que ha favorecido el crecimiento y la expansión de las instalaciones termosolares, en paralelo al desarrollo de la tecnología fotovoltaica.





Figura 1. Planta termosolar Ivanpah, E.U.A. (TECPA 2021)

Además de los sistemas de aprovechamiento térmico de la radiación solar, otra de las tecnologías más ampliamente desarrolladas es la energía fotovoltaica. Esta energía se basa en el aprovechamiento del efecto fotovoltaico (Green, 1993), fenómeno que se basa en el efecto fotoeléctrico. Este efecto ocurre cuando los electrones en la banda de valencia de un material semiconductor son excitados por la radiación luminosa, adquiriendo suficiente energía como para superar la banda prohibida (band gap) y pasar a la banda de conducción. La excitación de estos electrones de la banda de valencia a la banda de conducción genera huecos con carga positiva (Chopra y col., 2004), en la banda de valencia y electrones negativos en la banda de conducción, produciendo una diferencia de potencial que puede ser aprovechada para generar corriente eléctrica (Figura 2).

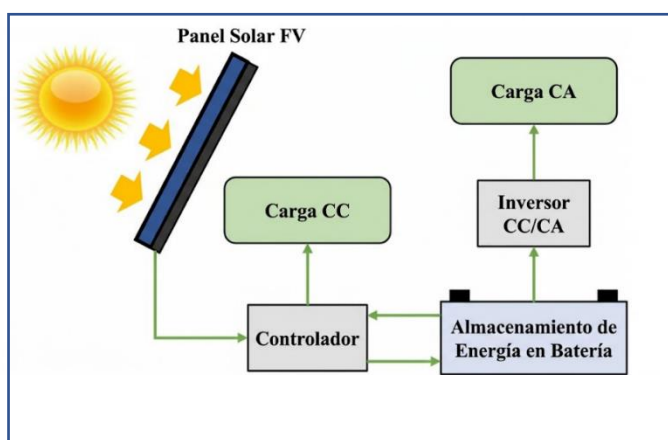


Figura 2. Sistema fotovoltaico solar (Al-Ali y col., 2025)

El uso de la tecnología de celdas solares ha aumentado significativamente con el tiempo, gracias a su implementación en plantas solares en numerosos países (Figura 3). Solo durante 2023, la capacidad de producción instalada de paneles solares alcanzó un récord de 407 GW, elevando la capacidad total mundial a 1.6 TW (Renewable Energy Agency, 2024). China fue responsable del 53% del total mundial en ese mismo año, destacando por su liderazgo en la expansión de la energía solar.

La energía solar se utiliza a escala industrial, como en sistemas de generación distribuida. A nivel industrial, se implementa en grandes plantas o parques solares, como, por ejemplo, el Parque Solar Villanueva en México ubicado a cercanías de Torreón Coahuila, con una generación de 754 MW siendo el parque solar más grande de Latinoamérica. De manera complementaria, esta tecnología también se aplica en sistemas de generación distribuida instalados en y a escala distribuida, ya sea en hogares y oficinas. Una de sus limitantes más grandes del uso de la tecnología solar para la producción de energía, es el alto costo de producción e instalación (Seyisi y col., 2025), estimado en 650 millones de dólares para el caso del parque Villanueva. No obstante, estos costos se han reducido considerablemente año con año, lo que ha facilitado una adopción más amplia tanto a nivel industrial como doméstico mediante la instalación de paneles solares en hogares, oficinas y edificios (Al-Ali y col., 2025).

Además, países como el Reino Unido y Bélgica han implementado incentivos fiscales, incluyendo la reducción o eliminación de impuestos sobre estas tecnologías con el objetivo de fomentar su adopción (Chadly y col., 2024). En cuanto a los costos de esta tecnología, el costo nivelado de energía (LCOE) de un parque solar se estima en 39 USD/MWh, sin embargo, se estima que para 2035 caerá un 35% según BloombergNEF.

Para el funcionamiento de estas tecnologías se emplean diversos materiales especializados que requieren un manejo específico. En el caso de las celdas solares fotovoltaicas, es indispensable el uso de materiales semiconductores capaces de convertir la energía luminosa en energía eléctrica. Entre los materiales más utilizados destacan distintas formas cristalinas de silicio (Si) debido a su gran eficiencia, alta abundancia y estabilidad (Green, 1993). No obstante, a pesar de sus características, se han implementado diversos materiales y aleaciones a base de elementos potencialmente tóxicos para el ambiente y el ser humano.



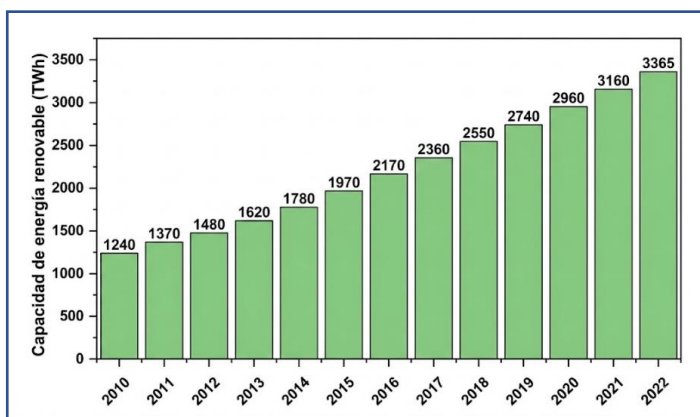


Figura 3. Adaptación de la energía renovable a nivel mundial (Hassan y col., 2023).

RETOS

RETOS ACTUALES

Aunque la energía solar se ha consolidado a nivel global como una alternativa viable para la transición hacia sistemas energéticos sostenibles, su adopción a gran escala enfrenta desafíos críticos. Estos factores sociales, económicos, políticos, técnicos y ambientales actúan como cuellos de botella que dificultan la transición energética integral (Nagaraja y col., 2025).

RETOS SOCIALES

En el ámbito social, la implementación se ve obstaculizada principalmente por limitaciones financieras y espaciales. En Jordania, por ejemplo, Al-Habaibeh y col. (2023) identificaron que las barreras legales (60%) y los riesgos de seguridad (26%) son las principales razones que frenan el uso doméstico (Al-Habaibeh y col., 2023).

Por otro lado, en Arabia Saudita, la escasez de productos asequibles en los mercados formales ha llevado a los sectores rurales al comercio informal, exponiendo a las comunidades vulnerables a tecnología falsificada o de baja calidad (Chanda y col., 2025). Además, el alto valor de los equipos ha

derivado en problemas de inseguridad y robo en diversas regiones (Abdul Qadir y col., 2026).

Finalmente, la falta de planeación territorial es evidente en asentamientos de rápido crecimiento, como el campamento Kigeme en Ruanda, donde la inestabilidad del terreno y las lluvias estacionales han comprometido el drenaje de las centrales eléctricas (Nixon y col., 2021).

RETOS ECONÓMICOS

El despliegue industrial de celdas solares se ve limitado en múltiples países por la falta de capital privado o estatal (Kumar Dalapati y col., 2023; Agbogla y col., 2025). En regiones de alta demanda y baja incidencia solar, como el Ártico finés, donde el 70% del consumo anual se destina a la calefacción, la baja radiación entre noviembre y marzo exige una sobredimensión crítica de los sistemas para garantizar el rendimiento (Shekar y col., 2026).

Los proyectos de gran tamaño requieren una inversión masiva que no se limita a la instalación, sino que abarca el desarrollo, la implementación y el mantenimiento a largo plazo, lo que hace indispensable el respaldo financiero público y privado (Asare-Addo, 2026; Salim y col., 2026).

RETOS POLÍTICOS

La industria fotovoltaica requiere no solo incentivos, sino también estabilidad normativa (Wu y col., 2023). La alternancia de administraciones en Estados Unidos, por ejemplo, ha generado incertidumbre debido a agendas que priorizan los combustibles fósiles y retrasan la inversión en energías limpias (Zhang, 2026).

En Arabia Saudita, las inconsistencias regulatorias generan desconfianza entre los inversionistas (Hassan y col., 2023), mientras que en Ghana existe el temor de que las políticas "verdes" afecten directamente los ingresos de las empresas eléctricas estatales, lo que frena la voluntad política de cambio (Akrofi y col., 2024).

RETOS TÉCNICOS

A pesar de los avances en eficiencia y ergonomía, la implementación comercial de prototipos de última generación sigue siendo una meta lejana



(Wu y col., 2026). Las tecnologías actuales presentan limitaciones en entornos extremos (alta salinidad, corrosión, temperaturas extremas o radiación intensa), donde el equipo sufre una degradación acelerada y requiere un mantenimiento costoso (Ukoba y col., 2024). Asimismo, la gestión de residuos y el fin de vida útil de los paneles exigen protocolos especializados para evitar la contaminación de suelos y acuíferos en regiones áridas (Asif y col., 2025; Mirnezami y col., 2025).

RETOS AMBIENTALES

Paradójicamente, la fabricación de ciertas tecnologías, especialmente las de capa delgada, implica procesos de minería y manufactura que emplean compuestos químicos tóxicos para la salud humana y los ecosistemas (Energy Agency, 2023). Si bien el silicio cristalino es la opción de menor impacto, la búsqueda de costos más bajos ha impulsado el uso de elementos peligrosos como plomo, telurio y selenio (Drygała y col., 2012). Actualmente, la investigación se centra en materiales alternativos más seguros y económicos, como los perovskitas y los semiconductores orgánicos, buscando una tecnología verdaderamente sustentable (Green, 1993).

CONCLUSIONES

Se ha reportado que la energía solar fotovoltaica es una de las energías renovables más utilizadas a nivel mundial, gracias a su mayor eficiencia energética frente a los combustibles fósiles. Esto ha llevado a un aumento exponencial en el uso de celdas solares y plantas termosolares para la generación de energía a nivel industrial y doméstico. Estas tecnologías, a su vez, presentan retos y dificultades, por lo cual se sigue investigando el aumento de la eficiencia, metodologías de síntesis más eficientes y materiales más económicos, accesibles y verdes. El uso de estas tecnologías, combinado con el estancamiento y la reducción del uso de combustibles fósiles, ha provocado un cambio gradual en múltiples países, por lo que se percibe un cambio total a la energía solar para el 2050.

REFERENCIAS

- Abdul Qadir, S., Ali, A., Islam, M. T., Shahid, M., & Ahmed, S. (2026). Critical success factors for large-scale solar projects: Insights for Saudi Arabia's energy transition. in *Cleaner Energy Systems*, 13: 100234. <https://doi.org/10.1016/j.cles.2026.100234>
- Agbogla, J., Sekyere, C. K. K., Forson, F. K., Opoku, R., & Baah, B. (2025). Soiling estimation methods in solar photovoltaic systems: Review, challenges and future directions. In *Results in Engineering*, 26: 104810. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104810>
- Akrofi, M. M., Okitasari, M., & McLellan, B. C. (2024). Socio-technical challenges and prospects of residential solar PV diffusion in Ghana: Insights from regime and intermediary actors. *Energy Research and Social Science*, 118: 103772. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2024.103772>
- Al-Ali, S., Olabi, A. G., & Mahmoud, M. (2025). A review of solar photovoltaic technologies: developments, challenges, and future perspectives. In *Energy Conversion and Management: X*, 27: 101057. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101057>
- Al-Habaibeh, A., Al-haj Moh'd, B., Massoud, H., Nweke, O. B., Al Takrouri, M., & Badr, B. E. A. (2023). Solar energy in Jordan: Investigating challenges and opportunities of using domestic solar energy systems. *World Development Sustainability*, 3: 100077. <https://doi.org/10.1016/j.wds.2023.100077>
- Asare-Addo, M. (2026). Wind and solar energy intermittency: The silver lining. *Results in Engineering*, 29: 108275. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108275>
- Asif, M., Sharieff, R., Olawale, M., & Khan, M. I. (2025). Unlocking the potential of unregulated rooftops for solar PV on residential buildings: Identifying and addressing key challenges. *Energy Nexus*, 18: 100447. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2025.100447>
- Chadly, A., Moawad, K., Salah, K., Omar, M., & Mayyas, A. (2024). State of global solar energy market: Overview, China's role, Challenges, and Opportunities. In *Sustainable Horizons*, 11: 100108. <https://doi.org/10.1016/j.horiz.2024.100108>
- Chanda, H., Mohareb, E., Peters, M., & Harty, C. (2025). "The solar E-waste challenge: A zambian case study of informal disposal, counterfeit technologies and low literacy." *Journal of Environmental Management*, 395: 127618. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.127618>
- Chopra, K. L., Paulson, P. D., & Dutta, V. (2004). Thin-film solar cells: An overview. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 12(2-3): 69-92. <https://doi.org/10.1002/pip.541>

- Drygała, A., Dobrzański, L. A., Giedroć, M., & Macek, M. (2012). Monocrystalline silicon solar cells applied in photovoltaic system. *Archives of Materials Science and Engineering*, 53(1):7-13. <https://www.researchgate.net/publication/289642017>
- Energy Agency, I. (2023). *Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach - 2023 Update*. www.iea.org/t&c/
- Green, M. A. (1993). Silicon solar cells: Evolution, high-efficiency design and efficiency enhancements. In *Semiconductor Science and Technology*, 8(1): 1-12. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/8/1/001>
- Hassan, Q., Algburi, S., Sameen, A. Z., Salman, H. M., & Jaszczur, M. (2023). A review of hybrid renewable energy systems: Solar and wind-powered solutions: Challenges, opportunities, and policy implications. In *Results in Engineering*, 20: 101621. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101621>
- Kumar Dalapati, G., Ghosh, S., Sherin P A, T., Ramasubramanian, B., Samanta, A., Rathour, A., Kin Shun Wong, T., Chakraborty, S., Ramakrishna, S., & Kumar, A. (2023). Maximizing solar energy production in ASEAN region: Opportunity and challenges. *Results in Engineering*, 20: 101525. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101525>
- Mahmoud, M., Adhari, O. H. K., Abdelkareem, M. A., & Olabi, A. G. (2026). Hybrid solar-geothermal energy systems: Technological developments, challenges, and scientific research dynamics. *Thermal Science and Engineering Progress*, 71: 104589. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2026.104589>
- Mirnezami, S. A., Huda, N., Saidur, R., & Strezov, V. (2025). A comprehensive review in pursuit of optimal solar performance: Nanofluids, solar hybrid systems, and challenges ahead. In *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 81: 104420. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2025.104420>
- Müller-Steinhagen, H. and Trieb, F. (2004). Concentrating solar power: A review of the technology, *Royal Academy of Engineering Ingenia*, 18: 43-50. https://www.researchgate.net/publication/394525918_Multi-effect_Desalination_Powered_by_Concentrated_Solar_Power_A_review
- Nagaraja, M. R., Biswas, W. K., & Selvan, C. P. (2025). Advancements and challenges in solar photovoltaic technologies: enhancing technical performance for sustainable clean energy – A review. In *Solar Energy Advances*, 5: 100084. <https://doi.org/10.1016/j.seja.2024.100084>
- Nixon, J. D., Bhargava, K., Halford, A., & Gaura, E. (2021). The challenges of community-based solar energy interventions: Lessons from two Rwandan Refugee Camps. *Energy for Sustainable Development*, 65: 175-184. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2021.07.007>
- SALIM, A., REHMAN, S. U., ABDULKAWI, W. M., & AHMED, H. Y. (2026). Overcoming barriers to solar energy adoption in Pakistan: Current status, policy gaps, and institutional

reforms. *Results in Engineering*, 29: 108537. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108537>

Seyisi, T., Fouda-Mbanga, B. G., Mnyango, J. I., Nthwane, Y. B., Nyoni, B., Mhlanga, S., Hlangothi, S. P., & Tywabi-Ngeva, Z. (2025). Major challenges for commercialization of perovskite solar cells: A critical review. In *Energy Reports* 13: 1400–1415. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2025.01.019>

Shekar, V., Calò, A., & Pongrácz, E. (2026). Optimising solar energy communities in arctic micro-communities: addressing building azimuth challenges in Finnish Lapland. *Renewable Energy Focus*, 57: 100798. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2025.100798>

Tecpa. (10 de febrero, 2021). *La central de energía termosolar más grande del mundo*. <https://www.tecpa.es/central-energia-termosolar-mas-grande/>

Ukoba, K., Yoro, K. O., Eterigho-Ikelegbe, O., Ibegbulam, C., & Jen, T. C. (2024). Adaptation of solar energy in the Global South: Prospects, challenges and opportunities. In *Heliyon*, 10: 7. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28009>

Wu, S., Liu, M., & Jen, A. K. Y. (2023). Prospects and challenges for perovskite-organic tandem solar cells. In *Joule*, 7(3): 484–502. Cell Press. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.02.014>

Wu, T., Gao, X., Liu, Z., Liu, X., Hao, X., & Zhang, M. (2026). The recycling of perovskite solar cells: progress, challenges and opportunities. *Science Bulletin*. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2026.02.003>

Zhang, Y. (2026). Solar PV in the 21st century: Aligning technological growth with sustainability. In *Next Energy*, 10: 100499. <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2025.100499>

BAINITA: LA MICROESTRUCTURA QUE COMBINA DUREZA Y TENACIDAD EN LOS ACEROS

BAINITE: THE MICROSTRUCTURE THAT COMBINES HARDNESS AND TOUGHNESS IN STEELS

CORTEZ GARCÍA, Manuel
Alejandro¹

SORIA AGUILAR, María De Jesús¹

GUTIÉRREZ CASTAÑEDA, Emmanuel
José²

CARRILLO PEDROZA, Francisco Raúl¹

RESUMEN

La bainita constituye una de las microestructuras más relevantes en el desarrollo de aceros avanzados debido a su capacidad para combinar alta resistencia mecánica con adecuada tenacidad. Este trabajo presenta una revisión bibliográfica sobre la formación de la bainita y la relación entre su microestructura y las propiedades mecánicas, considerando aspectos como la morfología de la ferrita bainítica, la estabilidad de la austenita retenida, la densidad de dislocaciones y la presencia o inhibición de carburos. Se analizan los aportes clásicos de Bhadeshia y Honeycombe, así como investigaciones recientes enfocadas en aceros bainíticos libres de carburos y rutas de procesamiento mediante austemperado y enfriamiento continuo. Asimismo, se discuten aplicaciones industriales en sectores como el automotriz, ferroviario y energético. La revisión muestra que el control preciso de la transformación bainítica permite optimizar simultáneamente resistencia, dureza y ductilidad, consolidando a la bainita como una microestructura estratégica para el diseño de aceros de alto desempeño.

Palabras clave: *bainita; transformación de fase; austemperado; austenita retenida; aceros avanzados.*

ABSTRACT

Bainite is one of the most relevant microstructures in the development of advanced steels due to its ability to combine high mechanical strength with adequate toughness. This work presents a bibliographic review of bainite formation and the relationship between its microstructure and mechanical properties, considering aspects such as bainitic ferrite morphology, retained austenite stability, dislocation density, and carbide precipitation or inhibition.

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

2. Facultad de Ingeniería,
Universidad Autónoma de San
Luis Potosí. San Luis Potosí, San
Luis Potosí, México.

Correspondencia
m-cortez@uadec.edu.mx
<https://orcid.org/0009-0002-1540-1635>
Fecha de recepción
13 de noviembre de 2025.
Fecha de aceptación
14 de mayo de 2026.

Classical contributions by Bhadeshia and Honeycombe are analyzed together with recent studies focused on carbide-free bainitic steels and processing routes based on austempering and continuous cooling. Industrial applications in the automotive, railway, and energy sectors are also discussed. The review demonstrates that precise control of the bainitic transformation allows simultaneous optimization of strength, hardness, and ductility, confirming bainite as a strategic microstructure for the design of high-performance steels.

Keywords: bainite; phase transformation; austempering; retained austenite; advanced steels.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de los aceros avanzados de alta resistencia (AHSS, por sus siglas en inglés) ha sido impulsado por la necesidad de materiales que ofrezcan simultáneamente elevada resistencia mecánica, buena ductilidad y comportamiento seguro frente a impacto y fatiga. En este contexto, la bainita ha adquirido un papel central dentro de la ingeniería metalúrgica moderna, al situarse como una microestructura intermedia entre la perlita y la martensita, capaz de combinar dureza y tenacidad mediante un adecuado control del tratamiento térmico y de la composición química.

Los fundamentos termodinámicos y cinéticos de la transformación bainítica se establecieron a partir de los trabajos clásicos de Bhadeshia y Honeycombe, quienes describieron la formación de láminas de ferrita bainítica acompañadas por austenita enriquecida en carbono. Estudios posteriores demostraron que la temperatura de transformación, el tamaño de grano previo y la inhibición de la precipitación de cementita influyen de manera directa en la morfología bainítica y, por ende, en las propiedades mecánicas del acero (Bhadeshia y col., 2017).

En años recientes, la investigación se ha enfocado en el desarrollo de aceros bainíticos libres de carburos, en los cuales la adición de elementos como silicio o aluminio evita la formación de cementita, favoreciendo la estabilidad de la austenita retenida y mejorando la ductilidad mediante el efecto TRIP (Transformación inducida por plasticidad). Estos avances han permitido

alcanzar resistencias superiores a 1400 MPa sin sacrificar tenacidad (García-Mateo y Caballero, 2005; Sun y col., 2024).

Actualmente, la bainita se emplea en sectores como el automotriz, ferroviario y energético, donde se demandan materiales con alta relación resistencia-peso y comportamiento confiable bajo condiciones severas de servicio. En este contexto, resulta importante integrar el conocimiento disponible sobre los mecanismos de transformación bainítica, las rutas de procesamiento y su impacto en la microestructura final.

La creciente demanda de materiales con alta relación resistencia-peso ha impulsado el desarrollo de nuevas generaciones de aceros avanzados. Dentro de este grupo, los aceros bainíticos han adquirido especial relevancia debido a su capacidad para combinar resistencia mecánica elevada con buena tenacidad y ductilidad. Estas propiedades resultan particularmente importantes en aplicaciones estructurales sometidas a cargas dinámicas, desgaste o condiciones severas de servicio.

Desde el punto de vista metalúrgico, la transformación bainítica representa uno de los fenómenos más complejos dentro de las transformaciones de fase en los aceros. Su naturaleza combina características tanto de transformaciones difusivas, como la perlítica, así como de transformaciones displacivas, como la martensítica. Esta combinación de mecanismos, ha sido objeto de numerosos estudios experimentales y teóricos a lo largo de las últimas décadas.

Los avances en técnicas de caracterización microestructural, como la microscopía electrónica de barrido (SEM), microscopía electrónica de transmisión (TEM) y difracción de rayos X, han permitido comprender con mayor detalle la morfología de la ferrita bainítica, la distribución de la austenita retenida y el papel de los elementos de aleación en la evolución microestructural. Estos estudios han contribuido significativamente al desarrollo de nuevos aceros bainíticos con propiedades mecánicas superiores.

El objetivo de este trabajo es revisar de manera crítica y actualizada los mecanismos de formación de la bainita y su relación con las propiedades mecánicas de los aceros, destacando los avances recientes en aceros bainíticos libres de carburos y sus aplicaciones tecnológicas.



METODOLOGÍA

La presente investigación se desarrolló como una revisión bibliográfica sistemática enfocada en la microestructura bainítica y su relación con las propiedades mecánicas de los aceros.

La búsqueda de literatura se realizó en bases de datos científicas especializadas, incluyendo: Scopus, Web of Science y ScienceDirect. Se consideraron principalmente artículos publicados en los últimos años, sin excluir trabajos clásicos ampliamente citados en la literatura metalúrgica.

Los criterios de selección incluyeron relevancia temática, calidad de la revista, claridad metodológica y contribución al entendimiento de los mecanismos de transformación y aplicaciones industriales.

La información recopilada fue analizada de manera comparativa para integrar los avances teóricos, experimentales y tecnológicos relacionados con la formación de bainita y su impacto en las propiedades mecánicas de los aceros.

DESARROLLO Y DISCUSIÓN

MECANISMOS DE TRANSFORMACIÓN BAINÍTICA Y EVOLUCIÓN MICROESTRUCTURAL

La transformación bainítica ocurre a partir de la austenita mediante un mecanismo displacivo acompañado por la difusión del carbono. Este proceso conduce a la formación de láminas de ferrita bainítica y a la estabilización progresiva de la austenita residual enriquecida en carbono. A diferencia de la perlita, donde la difusión del carbono controla completamente el crecimiento laminar, y de la martensita, que se forma mediante una transformación sin difusión, la bainita representa un mecanismo intermedio en el cual la redistribución del carbono ocurre posteriormente a la nucleación de la ferrita bainítica (Bhadeshia y col., 2017).

La cinética de esta transformación depende principalmente de la temperatura y del tiempo de permanencia, factores que se describen mediante los diagramas tiempo-temperatura-transformación (TTT). Estos diagramas permiten representar las condiciones bajo las cuales la austenita se transforma en diferentes microestructuras como perlita, bainita o martensita, dependiendo de la temperatura y del tiempo de enfriamiento.

Desde el punto de vista cinético, la nucleación de la ferrita bainítica se encuentra fuertemente influenciada por la energía libre disponible para la transformación y por la presencia de defectos cristalinos que actúan como sitios de nucleación. Las fronteras de grano de la austenita previa, así como las dislocaciones y subestructuras generadas durante el procesamiento térmico o mecánico, pueden favorecer la formación de bainita.

Asimismo, la velocidad de crecimiento de las láminas de ferrita bainítica depende de la difusión del carbono desde la ferrita hacia la austenita adyacente. Este proceso provoca un enriquecimiento progresivo de carbono en la austenita residual, lo cual contribuye a su estabilización a temperaturas más bajas. Como resultado, la microestructura final puede estar compuesta por ferrita bainítica, austenita retenida y, en algunos casos, pequeñas fracciones de martensita formada durante el enfriamiento final.

El control de estos procesos cinéticos resulta fundamental para el diseño de tratamientos térmicos adecuados, especialmente en procesos industriales como el austemperado o el enfriamiento continuo controlado.

INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS DE ALEACIÓN EN LA TRANSFORMACIÓN BAINÍTICA

La composición química del acero desempeña un papel fundamental en la cinética de transformación bainítica y en la estabilidad de las fases presentes. Diversos elementos de aleación pueden modificar significativamente la velocidad de transformación, la morfología de la ferrita bainítica y la estabilidad de la austenita retenida.

El silicio es uno de los elementos más utilizados en el diseño de aceros bainíticos avanzados debido a su capacidad para inhibir la precipitación de cementita durante la transformación bainítica. Al evitar la formación de carburos, el carbono expulsado desde la ferrita bainítica se concentra en la

austenita residual, aumentando su estabilidad y favoreciendo la presencia de austenita retenida en la microestructura final.

El manganeso también tiene un efecto importante al incrementar la templeabilidad del acero y desplazar las curvas de transformación en los diagramas TTT y CCT hacia tiempos mayores. Esto permite que la transformación bainítica ocurra en intervalos de temperatura más amplios, facilitando su obtención en procesos industriales.

Otros elementos como el cromo y el molibdeno contribuyen a retardar las transformaciones difusivas, favoreciendo la formación de bainita en lugar de perlita durante el enfriamiento. Asimismo, pequeñas adiciones de boro pueden mejorar la templeabilidad al inhibir la nucleación de ferrita en los límites de grano de la austenita.

El control adecuado de estos elementos de aleación permite diseñar aceros bainíticos con microestructuras más refinadas, mayor fracción de austenita retenida y mejores propiedades mecánicas, lo que ha impulsado el desarrollo de nuevas generaciones de aceros avanzados de alta resistencia.

DIAGRAMAS TTT

En los diagramas TTT se distinguen regiones características de transformación, separadas por curvas que indican el inicio y el final de la transformación de fase. En particular, la denominada nariz perlítica corresponde al punto donde la transformación de la austenita ocurre con mayor rapidez. La posición de esta región es especialmente importante en el diseño de tratamientos térmicos, ya que determina las condiciones de enfriamiento necesarias para evitar la formación de perlita y favorecer la obtención de bainita o martensita.

La Figura 1 muestra un diagrama tiempo-temperatura-transformación típica para aceros hipoeutectoides, en el cual se identifican las regiones de formación de perlita gruesa, perlita fina, bainita superior y bainita inferior. Asimismo, se observa la temperatura de inicio de formación de martensita (M_s), por debajo de la cual la transformación ocurre de manera prácticamente instantánea mediante un mecanismo sin difusión. Este tipo de diagramas permite comprender la relación entre temperatura de transformación, cinética de reacción y microestructura final obtenida en el acero.



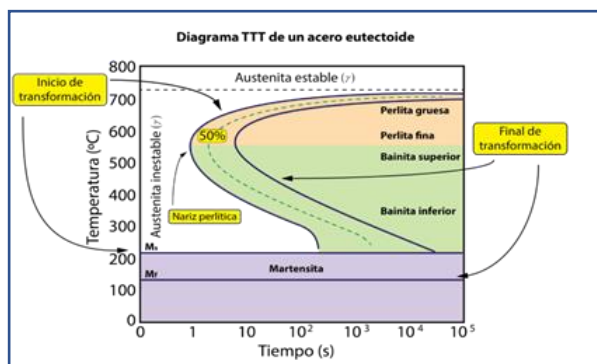


Figura 4. Diagrama TTT de las transformaciones de la austenita en aceros hipoeutectoides. (Adaptado de García-Mateo y Caballero 2005).

FORMACIÓN DE BAINITA SUPERIOR E INFERIOR

Además de la temperatura de transformación, los mecanismos de difusión del carbono desempeñan un papel fundamental en la evolución microestructural de la bainita.

A temperaturas relativamente elevadas se forma bainita superior, caracterizada por láminas de ferrita bainítica relativamente gruesas y por la precipitación de carburos entre las láminas.

Cuando la transformación ocurre a temperaturas más bajas se favorece la formación de bainita inferior, la cual presenta láminas más finas de ferrita bainítica y precipitación más dispersa de carburos dentro de la ferrita.

La Figura 2 ilustra de manera esquemática el mecanismo de formación de bainita superior y bainita inferior asociado a la difusión del carbono durante la transformación bainítica.

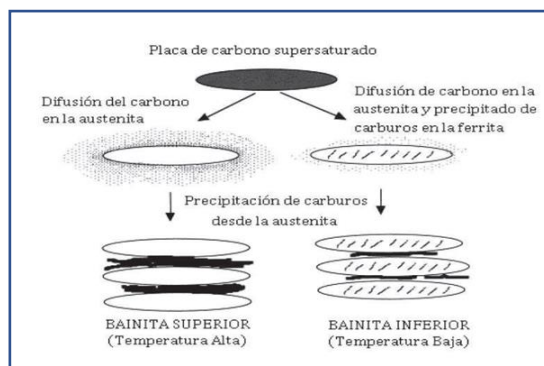


Figura 5. Bainita superior e inferior según la temperatura de transformación (Bhadeshia y col. 2017).

La diferencia entre bainita superior e inferior tiene una influencia directa en las propiedades mecánicas del acero. La bainita inferior presenta una microestructura más refinada y, por lo tanto, suele asociarse con mayores niveles de resistencia mecánica sin comprometer significativamente la tenacidad del material.

En los aceros con contenido elevado de silicio o aluminio, la precipitación de cementita durante la transformación bainítica puede inhibirse. Esto permite que el carbono expulsado desde la ferrita bainítica se concentre en la austenita residual, incrementando su estabilidad. Como consecuencia, se forma una microestructura compuesta por ferrita bainítica y austenita retenida estable, la cual puede transformarse parcialmente en martensita durante la deformación plástica, dando lugar al denominado efecto TRIP.

Este fenómeno contribuye a mejorar simultáneamente la resistencia y la ductilidad del material, lo que ha impulsado el desarrollo de aceros bainíticos libres de carburos, ampliamente investigados en los últimos años (García-Mateo y Caballero, 2005; Sun y col., 2024).

Diversos estudios han demostrado que la composición química desempeña un papel fundamental en la cinética de transformación bainítica y en la estabilidad de la austenita retenida. Elementos como silicio, aluminio y manganeso contribuyen a retardar la precipitación de carburos y a mejorar la templabilidad del acero, favoreciendo la formación de microestructuras bainíticas refinadas.

COMPARACIÓN DE INVESTIGACIONES RECIENTES

Diversas investigaciones han analizado la relación entre composición química, rutas de procesamiento y evolución microestructural en aceros bainíticos. La Tabla 1 resume algunos estudios representativos reportados en la literatura reciente, destacando los métodos de procesamiento utilizados, las microestructuras obtenidas y las propiedades mecánicas alcanzadas.

Tabla 1. Comparación de investigaciones recientes sobre aceros bainíticos.

Autor	Tipo de acero	Microestructura	Propiedades
Caballero y Bhadeshia (2004)	Bainítico de alta resistencia	Bainita ultrafina	>1500 MPa
García-Mateo y Caballero (2005)	Bainita libre de carburos	Ferrita bainítica + austenita retenida	Alta resistencia
Hu y col. (2014)	Bainítico bajo aleado	Bainita refinada	Mejora de resistencia
Kundu y col. (2020)	Bainítico medio carbono	Bainita + austenita retenida	Mayor ductilidad
Assali y col. (2024)	Bainítico industrial	Bainita refinada	Buen desempeño mecánico
Rana y col. (2024)	Bainita libre de carburos	Bainita estable	Alta resistencia
Sun y col. (2024)	Bainítico industrial	Bainita fina	Mejores propiedades
Zhou y col. (2024)	Bainítico medio carbono	Bainita libre de carburos	Microestructura refinada
Li y col. (2025)	Bainita libre de carburos	Bainita refinada	Mayor ductilidad
Mobedpour y col. (2025)	Bainítico laminado	Evolución bainítica	Mejores propiedades

DISCUSIÓN

El análisis comparativo de la literatura demuestra que la bainita constituye una microestructura altamente versátil para el desarrollo de aceros avanzados de alta resistencia.

En los últimos años, la investigación en aceros bainíticos se ha orientado hacia el desarrollo de microestructuras cada vez más refinadas, particularmente en sistemas conocidos como nanobainita o bainita nanométrica. Estos materiales se caracterizan por la formación de láminas ultrafinas de ferrita bainítica separadas por películas de austenita retenida enriquecida en carbono, lo que permite alcanzar combinaciones excepcionales de resistencia y ductilidad. Estudios recientes han demostrado que mediante el control de la composición



química y de las rutas de enfriamiento es posible obtener resistencias superiores a 1500–2000 MPa manteniendo una ductilidad adecuada, lo que amplía significativamente el potencial de aplicación de estos aceros en sectores estructurales avanzados (Rana y col., 2024; Zhou y col., 2024; Li y col., 2025). Estos avances refuerzan el interés científico y tecnológico en la transformación bainítica como una vía efectiva para el diseño de aceros de alto desempeño.

Diversos estudios experimentales y modelos cinéticos han contribuido a mejorar la comprensión de la transformación bainítica y su relación con las propiedades mecánicas de los aceros. Investigaciones recientes han analizado la evolución microestructural y la estabilidad de la austenita retenida en diferentes composiciones de acero bainítico, confirmando la influencia del tamaño de grano previo, la cinética de transformación y las rutas de procesamiento térmico sobre las propiedades finales del material (Peet y Bhadeshia, 2021; Wang y col., 2023). Asimismo, investigaciones recientes han explorado nuevos enfoques para el diseño de aceros bainíticos libres de carburos y su comportamiento bajo diferentes condiciones de procesamiento industrial, ampliando el conocimiento sobre los mecanismos de transformación bainítica (Wang y col., 2025).

La principal ventaja de esta microestructura radica en su capacidad para integrar mecanismos de transformación displacivos y difusivos, lo que permite alcanzar un equilibrio favorable entre resistencia mecánica, ductilidad y tenacidad.

Otro aspecto relevante en el estudio de la bainita es la influencia de los elementos de aleación en la cinética de transformación y en la estabilidad de las fases presentes. Elementos como el silicio y el aluminio desempeñan un papel clave al inhibir la precipitación de cementita durante la transformación bainítica. Esta inhibición favorece la retención de carbono en la austenita, aumentando su estabilidad térmica y mecánica.

Por otra parte, elementos como el manganeso y el cromo contribuyen a mejorar la templabilidad del acero, desplazando las curvas de transformación en los diagramas TTT y CCT hacia tiempos mayores. Esto facilita la obtención de microestructuras bainíticas en secciones más gruesas del material, lo cual resulta particularmente importante en aplicaciones industriales.

Además, el desarrollo de aceros bainíticos ultrafinos ha permitido alcanzar propiedades mecánicas excepcionales. En estos materiales, el espesor de las láminas de ferrita bainítica puede encontrarse en el rango nanométrico, generando una microestructura extremadamente refinada que contribuye al aumento significativo de la resistencia mecánica sin comprometer la ductilidad.

Estos avances han abierto nuevas posibilidades para el uso de aceros bainíticos en aplicaciones de ingeniería avanzada, incluyendo componentes automotrices de alta seguridad, rieles ferroviarios de alto desempeño y estructuras sometidas a condiciones severas de carga y desgaste.

Diversos estudios coinciden en que la temperatura de transformación es uno de los factores más influyentes en la evolución microestructural de la bainita. A temperaturas más elevadas se forma bainita superior, mientras que a temperaturas más bajas se favorece la formación de bainita inferior o nanobainita.

Asimismo, la estabilidad de la austenita retenida desempeña un papel fundamental en la respuesta mecánica de los aceros bainíticos. La inhibición de la precipitación de cementita mediante la adición de silicio o aluminio favorece la partición del carbono hacia la austenita residual, incrementando su estabilidad frente a la transformación martensítica durante la deformación.

Desde el punto de vista del procesamiento, las rutas tradicionales de austemperado isotérmico han sido complementadas por estrategias más viables industrialmente, como el enfriamiento continuo controlado y el ausforming, las cuales permiten generar microestructuras bainíticas refinadas en tiempos más cortos.

CONCLUSIONES

La revisión realizada confirma que la bainita representa una de las microestructuras más versátiles en el diseño de aceros avanzados de alta resistencia.

El control preciso de la temperatura de transformación, la cinética de difusión del carbono y la inhibición de la precipitación de cementita permiten obtener microestructuras refinadas con fracciones significativas de austenita retenida estable.

Los avances recientes en rutas de procesamiento han demostrado la viabilidad industrial de estas microestructuras, consolidando a la bainita como una alternativa tecnológica clave para aplicaciones estructurales exigentes.

En términos generales, el estudio de la transformación bainítica continúa siendo un área activa de investigación dentro de la metalurgia física. La comprensión detallada de los mecanismos de nucleación, crecimiento y estabilización de las fases presentes permite diseñar nuevas composiciones de acero y optimizar rutas de procesamiento térmico capaces de generar microestructuras cada vez más refinadas y eficientes desde el punto de vista mecánico.

Por ello, el desarrollo de aceros bainíticos avanzados representa una línea estratégica para la industria siderúrgica moderna, especialmente en un contexto donde se requiere mejorar simultáneamente el desempeño mecánico, la seguridad estructural y la eficiencia en el uso de materiales.

AGRADECIMIENTOS

Manuel Alejandro Cortez García, No. CVU: 642172 agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) y a la Universidad Autónoma de Coahuila, por el apoyo brindado en el desarrollo del proyecto de tesis.

REFERENCIAS

- Assali, A., Virtanen, P. y Haouaoui, M. (2024). Modelling and experimental validation of bainite formation under dynamic cooling conditions. *Acta Materialia*, 262: 119456. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2024.119456>
- Bhadeshia, H. K. D. H. y Honeycombe, R. (2017). *Steels: Microstructure and Properties* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Bhadeshia, H. K. D. H. (1980–2017). Some aspects of the bainite transformation. PhD Thesis. University of Cambridge.
- Caballero, F. G. y Bhadeshia, H. K. D. H. (2004). Very strong bainite. *Materials Science and Technology*, 20(8): 814–818.
- Callister, W. D. (2018). *Fundamentals of Materials Science and Engineering*. Wiley.
- García-Mateo, C. y Caballero, F. G. (2005). Ultra-high strength bainitic steels. *ISI International*, 45(11): 1736–1740.
- Hu, F., Wu, K. M. y Zheng, H. (2014). Effect of prior austenite grain size on bainitic microstructure and mechanical properties. *Journal of Materials Science*, 49(24): 8312–8318.
- Kundu, S., Ray, R. K. y Bhattacharya, D. (2020). Microstructure and ductility in medium carbon bainitic steels. *Materials Science and Engineering A*, 777: 139087.
- Li, J., Zhang, T., Wang, H. y Xu, Y. (2025). Improving fracture strain of carbide-free bainitic steel via ausforming treatment. *Materials Today Communications*, 37: 109876. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.109876>
- Mobedpour, R., Fazeli, F. y Zurob, H. S. (2025). Microstructure evolution of cold-rolled carbide-free bainite steel sheets during continuous annealing process. *Metals*, 15(2): 125. <https://doi.org/10.3390/met15020125>
- Ohmori, Y. y Maki, T. (1991). Microstructure and toughness of bainitic low alloy steels. *Materials Transactions, JIM*, 32(7): 631–641.
- Peet, M. y Bhadeshia, H. K. D. H. (2021). Modeling bainite transformation. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 52(3): 1345–1355.
- Rana, R., Das, S., Singh, V. y Ghosh, S. (2024). Design of carbide-free bainitic steels for hot rolling practices. *Philosophical Magazine Letters*, 104(2): 85–97. <https://doi.org/10.1080/09500839.2024.2322552>
- Sun, B., Wang, D. y Yan, W. (2024). Optimization of continuous cooling bainitic transformation for industrial strip steels. *ISI International*, 64(5): 879–888. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2023-503>

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

- Wang, P., Chen, P., Yang, D., Wang, T. y Yi, H. (2023). 980 MPa grade low-alloy carbide-free bainitic steel obtained by dynamic continuous cooling transformation. *Crystals*, 13(2): 213.
- Wang, Q., Liu, J., Zhang, X. y Chen, P. (2025). New insights for preformed martensite of carbide-free bainitic steels. *Journal of Materials Research and Technology*, 29: 4321–4335. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.03.012>
- Zhou, K., Zhang, Z. y Wang, R. (2024). Effect of silicon and cooling rate on carbide-free bainitic transformation in medium-carbon steels. *Materials Science and Engineering A*, 890: 145832. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.145832>

DEL MINERAL AL METAL BRILLANTE: NUEVAS MIRADAS A LA EXTRACCIÓN Y REFINACIÓN DEL ANTIMONIO

FROM ORE TO SHINING METAL: NEW PERSPECTIVES OF THE EXTRACTION AND REFINING OF ANTIMONY

RESUMEN

El antimonio, reconocido como un metal crítico estratégico, desempeña un papel fundamental en la fabricación de retardantes de llama, baterías de plomo-ácido, microcondensadores y diversos componentes electrónicos. Su principal fuente mineral es la estibina (Sb_2S_3), un sulfuro que tradicionalmente se procesa mediante rutas pirometalúrgicas convencionales. El método más difundido es la tostación oxidante, proceso eficiente para concentrar y transformar el mineral, pero asociado a un elevado impacto ambiental. Durante la tostación se generan emisiones significativas de dióxido de azufre (SO_2), además de residuos peligrosos que pueden contener arsénico y otros metales potencialmente tóxicos. Esta revisión analiza críticamente las tecnologías actuales de extracción, comparando los métodos tradicionales con enfoques innovadores basados en los principios de la química verde. Se presta especial atención a los procesos hidrometalúrgicos emergentes que emplean agentes lixiviantes más sostenibles, como ácidos orgánicos o soluciones de cloruro férrico, capaces de disolver selectivamente la estibina a temperatura ambiente; alternativas que reducen la formación de gases tóxicos y permiten obtener antimonio de alta pureza en solución, facilitando etapas posteriores de recuperación. Se examinan técnicas como la electrolisis utilizando electrolitos limpios, lo que evita el uso de fundentes agresivos y disminuye el consumo energético global del proceso. El análisis comparativo indica que, aunque la tostación continúa dominando la industria, la hidrometalurgia verde ofrece un potencial significativo para mitigar la huella ecológica del sector. No obstante, persisten desafíos relacionados con la escalabilidad industrial, la optimización cinética y el control preciso del pH y del potencial redox. Se concluye que el futuro del antimonio dependerá de procesos híbridos y modelos de economía circular orientados al reciclaje eficiente.

GALAVIZ BRIONES, Lorena ¹

CARRILLO PEDROZA, Francisco Raúl ¹

SORIA AGUILAR, María De Jesús ¹

GARCÍA GUERRA AGUILAR, Josefina ¹

GONZÁLEZ ANAYA, Juan Antonio ²

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

2. Unidad Académica de Ciencias
de la Tierra, Universidad
Autónoma de Zacatecas.
Zacatecas, Zacatecas, México.

Correspondencia
lorenagalaviz@uadec.edu.mx
<https://orcid.org/0009-0008-1220-5755>
Fecha de recepción
6 de noviembre de 2025.
Fecha de aceptación
12 de marzo de 2026.

Palabras clave: antimonio; estibina; pirometalurgia; hidrometalurgia; química verde; extracción.

ABSTRACT

Antimony, recognized as a strategic critical metal, plays a fundamental role in the manufacture of flame retardants, lead–acid batteries, microcapacitors, and various electronic components. Its main mineral source is stibnite (Sb_2S_3), a sulfide traditionally processed through conventional pyrometallurgical routes. The most widespread method is oxidative roasting, an efficient process for concentrating and transforming the ore, but one associated with significant environmental impact. During roasting, substantial emissions of sulfur dioxide (SO_2) are generated, along with hazardous residues that may contain arsenic and other potentially toxic metals. This review critically examines current extraction technologies, comparing traditional methods with innovative approaches based on green chemistry principles. Special attention is given to emerging hydrometallurgical processes that employ more sustainable leaching agents, such as organic acids or ferric chloride solutions, capable of selectively dissolving stibnite at room temperature. These alternatives reduce the formation of toxic gases and enable the recovery of high-purity antimony in solution, facilitating subsequent processing stages. Advanced techniques such as electrorefining using clean electrolytes are also discussed, as they avoid the use of aggressive fluxes and decrease overall energy consumption. Comparative analysis indicates that although roasting continues to dominate industry due to its high productivity and technological maturity, green hydrometallurgy offers significant potential to reduce the sector's ecological footprint. Nevertheless, challenges remain regarding industrial scalability, kinetic optimization, and precise control of pH and redox potential. The future of antimony metallurgy will likely depend on hybrid processing schemes and circular economy strategies aimed at efficient electronic waste recycling and sustainable resource management practices.

Keywords: antimony; stibnite; pyrometallurgy; hydrometallurgy; green chemistry; extraction.



INTRODUCCIÓN

El antimonio (Sb) constituye un metal estratégico en la economía moderna debido a su amplia aplicación en retardantes de llama, aleaciones para baterías de plomo-ácido y dispositivos semiconductores, sectores que concentran la mayor parte del consumo mundial (Anderson, 2022; Álvarez Pelegry y Blanco Álvarez, 2023). Su importancia económica y tecnológica ha motivado que la Comisión Europea (2020) lo clasifique como material crítico, destacando la vulnerabilidad de su cadena de suministro y la elevada concentración geográfica de su producción. Estudios recientes han profundizado en la fragilidad de esta cadena y en la necesidad de fortalecer su resiliencia mediante innovación tecnológica y diversificación de fuentes (Van den Brink y col., 2022; Zhang y col., 2023).

El principal mineral portador de antimonio es la estibina (Sb_2S_3), cuyo procesamiento industrial se ha basado tradicionalmente en la tostación oxidante, una ruta pirometalúrgica eficiente para la conversión del sulfuro a óxidos (Deng y col., 2020). Sin embargo, este método genera emisiones de SO_2 y vapores de Sb_2O_3 , asociados a riesgos ambientales y ocupacionales significativos (Li y col., 2021; Martínez y Delgado, 2022). Tales impactos han impulsado la búsqueda de alternativas más limpias, alineadas con los principios de la química verde propuestos por Anastas y Warner (1998), orientadas a minimizar la generación de sustancias peligrosas. Desde el punto de vista mineralógico, la estibina presenta un hábito cristalino prismático y un característico brillo metálico, como se observa en la Figura 1, propiedades que influyen directamente en su comportamiento fisicoquímico durante los procesos de tostación y lixiviación (Jova Geology, 2014).



Figura 1. Representación del mineral de antimonio (Jova Geology, 2014).

En este contexto, las tecnologías hidrometalúrgicas han cobrado relevancia como opciones técnicamente viables y ambientalmente preferibles, al emplear lixiviantes menos agresivos y condiciones moderadas de operación que favorecen una mayor selectividad y control del proceso (Chen y col., 2021; Zhang y col., 2023). Desde una perspectiva científica y técnica, resulta indispensable evaluar comparativamente estas rutas para determinar su factibilidad industrial, su desempeño cinético y su impacto ambiental. Social y económicamente, la adopción de procesos más sostenibles puede reducir riesgos a la salud, cumplir regulaciones ambientales más estrictas y fortalecer la competitividad del sector.

El objetivo de este trabajo es analizar críticamente el estado del arte en la extracción y refinación del antimonio, comparando los métodos pirometalúrgicos convencionales con las alternativas hidrometalúrgicas emergentes, a fin de identificar oportunidades para una metalurgia más eficiente, limpia y alineada con un modelo de economía circular.

METODOLOGÍA

El presente estudio se desarrolló bajo el enfoque de revisión sistemática narrativa, orientada al análisis comparativo de tecnologías de extracción y refinación de antimonio. La investigación se realizó en México durante el periodo enero–diciembre de 2025. El diseño metodológico se estructuró en concordancia con el objetivo del trabajo, consistente en evaluar críticamente métodos pirometalúrgicos convencionales y alternativas hidrometalúrgicas emergentes bajo criterios de eficiencia metalúrgica y sostenibilidad ambiental.

La estrategia de búsqueda bibliográfica se ejecutó en bases de datos científicas arbitradas de alto impacto (Scopus, Web of Science y ScienceDirect). Se emplearon combinaciones booleanas de términos como “*antimony extraction*”, “*stibnite roasting*”, “*hydrometallurgical leaching*” y “*green metallurgy*”.

Siguiendo la metodología de revisiones sistemáticas descrita por Chen y col. (2021) y ampliada en estudios posteriores (Zhang y col., 2023; Fernández y col., 2024), se establecieron criterios de inclusión y exclusión para garantizar

rigor científico. Se priorizaron publicaciones del periodo 2019–2024, asegurando que al menos 40 % de las referencias correspondieran a los últimos cinco años.

Los criterios de inclusión fueron:

- (i) Estudios con datos experimentales verificables
- (ii) Descripción detallada de condiciones operativas
- (iii) Reporte de eficiencia de recuperación de Sb
- (iv) Evaluación energética o ambiental del proceso.

CLASIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS MÉTODOS

Las tecnologías identificadas se agruparon en dos categorías principales: pirometalurgia e hidrometalurgia, con subclasificación en convencionales y emergentes o verdes.

Para cada estudio se extrajeron las siguientes variables técnicas:

- Eficiencia de extracción (% de recuperación de Sb).
- Condiciones operativas (temperatura, presión, pH y concentración de reactivos).
- Consumo energético.
- Impacto ambiental.
- Nivel de Madurez Tecnológica (TRL 1–9).

La clasificación tecnológica se fundamentó en reportes recientes sobre procesamiento de estibina (Deng y col., 2020; Li y col., 2021; Zhang y col., 2023). Cuando múltiples autores respaldaron una misma tendencia tecnológica, la literatura se organizó en orden cronológico (Deng y col., 2020; Li y col., 2021; Zhang y col., 2023).

DESARROLLO

MÉTODOS PIROMETALÚRGICOS

La pirometalurgia constituye la ruta industrial tradicional para la extracción de antimonio a partir de estibina (Sb_2S_3). En esta revisión se analizaron estudios experimentales e industriales que describen los procesos de tostación oxidante, reducción carbotérmica y fusión reductora, evaluando variables como temperatura de operación, tiempo de residencia, atmósfera de reacción, consumo energético y eficiencia de recuperación metálica.

La tostación oxidante se desarrolla típicamente en hornos de reverbero o de lecho fluidizado, operando en un rango de temperatura de 800–1000 °C bajo atmósfera controlada de aire u oxígeno. Anderson (2022) reporta que la oxidación de la estibina genera Sb_2O_3 como producto intermedio y libera SO_2 gaseoso, cuya concentración depende del flujo de aire y del contenido de azufre en el mineral. Estudios previos demostraron que incrementos en la temperatura favorecen la cinética de oxidación, pero también aumentan las pérdidas por volatilización de Sb_2O_3 (Deng y col., 2020; Li y col., 2021).

Posteriormente, el óxido de antimonio obtenido puede ser sometido a reducción carbotérmica en hornos eléctricos o de cuba. En esta etapa, el Sb_2O_3 se mezcla con carbón o coque metalúrgico como agente reductor y se calienta a temperaturas entre 1000 y 1200 °C. Martínez y Delgado (2022) indican que la eficiencia de recuperación puede alcanzar valores superiores al 90 %, dependiendo del tamaño de partícula, pureza del concentrado y control atmosférico.

Algunos estudios han evaluado modificaciones del proceso tradicional para mejorar la captura de emisiones y la eficiencia térmica. Zhang y col. (2024a, 2024b) describen mejoras en sistemas de condensación de vapores de Sb_2O_3 y tecnologías de recuperación de calor residual, reduciendo el consumo energético específico del proceso.

Diversos autores coinciden en que el principal desafío ambiental de la pirometalurgia radica en la emisión de dióxido de azufre y la generación de escorias con metales pesados (Deng y col., 2020; Martínez y Delgado, 2022; Zhang y col., 2023). Cuando múltiples investigaciones respaldaron estos impactos, la literatura se organizó en orden cronológico para su análisis



comparativo (Deng y col., 2020; Li y col., 2021; Zhang y col., 2023). Desde el punto de vista tecnológico, estos procesos presentan un Nivel de Madurez Tecnológica (TRL) de 8–9, al tratarse de tecnologías comercialmente consolidadas a escala industrial. Sin embargo, su elevada demanda energética y huella ambiental han impulsado el desarrollo de alternativas hidrometalúrgicas consideradas más sostenibles (Zhang y col., 2023).

La Figura 2 presenta un esquema general del procesamiento pirometalúrgico del antimonio, incluyendo las etapas de tostación oxidante y reducción carbotérmica. Este esquema permite visualizar la transformación secuencial de Sb_2S_3 a Sb_2O_3 y finalmente a Sb metálico, así como los puntos críticos de generación de emisiones.

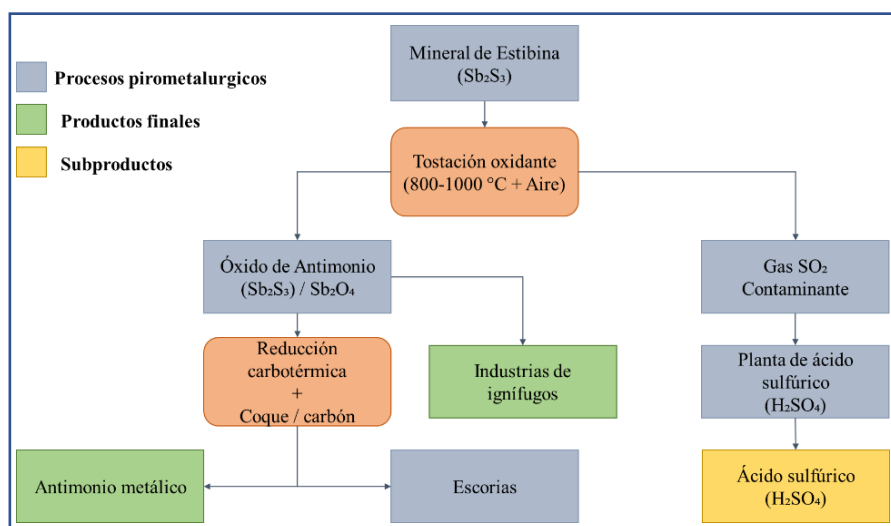


Figura 2. Esquema de procesamiento pirometalúrgico de antimonio vía tostación y reducción carbotérmica. Elaboración propia con base en Anderson (2022) y Deng y col. (2020).

MÉTODOS HIDROMETALÚRGICOS

La hidrometalurgia ha emergido como alternativa tecnológica a los procesos pirometalúrgicos tradicionales debido a su menor consumo energético y potencial reducción de emisiones gaseosas (SO_2). En esta revisión se analizaron estudios experimentales enfocados en la lixiviación selectiva de estibina (Sb_2S_3) y concentrados secundarios, evaluando variables como tipo de agente lixivante, concentración de reactivos, pH, temperatura, relación sólida/líquido, tiempo de residencia, cinética de disolución y eficiencia de recuperación metálica.



Las rutas hidrometalúrgicas identificadas se clasificaron en tres grupos principales: lixiviación alcalina sulfurosa, lixiviación en medio clorurado y lixiviación con sistemas ácidos u orgánicos.

La lixiviación alcalina con sulfuros (Na_2S – NaOH) es una de las rutas más estudiadas. Li y col. (2021) describen que la estibina se disuelve formando complejos tiosulfurados solubles bajo condiciones de $\text{pH} > 12$ y temperaturas entre 60 y 90 °C.

Las variables operativas críticas reportadas incluyen:

- Concentración de Na_2S (50–150 g/L).
- pH del sistema (12–14).
- Temperatura (60–90 °C).
- Relación sólido/líquido (1:5 a 1:10).
- Tiempo de lixiviación (1–6 h).

Chen y col. (2021) evaluaron sistemas clorurados empleando HCl o soluciones mixtas con NaCl, favoreciendo la formación de complejos SbCl_4^- en medio ácido. Estos sistemas operan a temperaturas moderadas (25–80 °C) y permiten mayores velocidades de disolución, aunque presentan riesgos de corrosión y generación de efluentes ácidos.

Investigaciones posteriores han explorado lixiviantes orgánicos y sistemas más sostenibles, incluyendo ácidos orgánicos débiles y agentes complejantes biodegradables. Zhang y col. (2023) reportan recuperaciones superiores al 85 % bajo condiciones suaves (<80 °C), con menor generación de subproductos tóxicos. Cuando múltiples estudios respaldaron la mejora ambiental de estas tecnologías, se organizaron en orden cronológico (Li y col., 2021; Chen y col., 2021; Zhang y col., 2023).

En términos cinéticos, varios autores coinciden en que el proceso de disolución de Sb_2S_3 se ajusta frecuentemente al modelo de núcleo decreciente controlado por difusión a través de la capa de productos (Li y col., 2021; Zhang y col., 2023). Las energías de activación reportadas oscilan entre 25 y 45 kJ/mol, lo que sugiere control mixto químico-difusional dependiendo del sistema lixiviante.



A continuación la Tabla 1 se resume comparativamente los principales métodos hidrometalúrgicos evaluados, destacando ventajas operativas y limitaciones técnicas asociadas a cada sistema lixivante.

Tabla 2. Evaluación comparativa de métodos hidrometalúrgicos para la lixiviación de antimonio. Elaboración propia con base en Chen y col. (2021), Li y col. (2021), Ye y col. (2016) y Zhang y col. (2023).

Método	Agente	Ventaja principal	Limitación clave
Alcalina	Na_2S	Selectividad para minerales complejos	Generación H_2S
Haluros	Cl^-/Br^-	Cinética rápida	Alta corrosividad
Ác. Orgánicos	Ác. Cítrico/ oxálico	Bajo impacto ambiental	Cinética lenta
Agentes quelantes	EDTA	Alta selectividad	Costo elevado

Como se observa en la Tabla 1, los sistemas alcalinos presentan alta selectividad, aunque con riesgos de generación de H_2S , mientras que los sistemas basados en ácidos orgánicos ofrecen menor impacto ambiental, pero con cinéticas más lentas.

MÉTODOS DE PURIFICACIÓN Y REFINACIÓN

Una vez obtenidas las soluciones enriquecidas con antimonio mediante lixiviación, se analizaron técnicas orientadas a la recuperación y purificación del metal, considerando pureza final, eficiencia del proceso y viabilidad ambiental.

La cementación consiste en la precipitación del antimonio mediante la adición de un metal más reactivo, como zinc o hierro, favoreciendo su reducción y separación en fase sólida. Es un método simple y de bajo costo, aunque el producto obtenido suele requerir etapas posteriores de refinación debido a su menor pureza.

La electro-obtención (EO) y la electro-refinación (ER) constituyen los principales métodos para obtener antimonio de alta pureza (>99.5 %). En la EO el metal se deposita directamente desde la solución lixiviada, mientras que en la ER se refina un ánodo impuro para producir un cátodo de mayor pureza. Los



fundamentos de estos procesos han sido documentados por López y col. (2019). Investigaciones recientes han propuesto electrolitos más benignos que sustituyen sistemas tradicionales basados en fluoruros o cloruros ácidos, reduciendo riesgos ambientales (Fernández y col., 2023; Zhang, B. y col., 2024; Zhang, W. y col., 2024).

MÉTODOS DE APOYO Y CARACTERIZACIÓN

Para complementar la evaluación de las rutas de extracción y refinación, se consideraron herramientas de análisis ambiental y técnicas instrumentales de caracterización. El análisis de ciclo de vida (ACV) se utilizó como herramienta comparativa para estimar el impacto ambiental global de las diferentes tecnologías, integrando indicadores como consumo energético y emisiones asociadas (Martínez y Delgado, 2022).

Asimismo, los estudios revisados emplearon técnicas como Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), Difracción de Rayos X (XRD) y Espectroscopía Fotoelectrónica de Rayos X (XPS) para evaluar fases cristalinas, morfología y estados de oxidación del antimonio, permitiendo interpretar mecanismos de reacción y calidad del producto final.

DISCUSIÓN

El análisis sistemático de la literatura permitió identificar las principales tendencias tecnológicas en la metalurgia del antimonio, evidenciando una transición progresiva desde procesos convencionales de alta intensidad energética hacia alternativas con menor impacto ambiental. A partir de la información recopilada, se realizó una comparación técnica considerando eficiencia de recuperación, consumo energético, impacto ambiental y nivel de madurez tecnológica.

EVALUACIÓN COMPARATIVA DE TECNOLOGÍAS CONVENCIONALES VS ALTERNATIVAS VERDES

La metalurgia del antimonio se ha estructurado históricamente en dos grandes enfoques: procesos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos.



Los métodos pirometalúrgicos presentan ventajas en términos de escalabilidad industrial y procesamiento de minerales de alta ley, alcanzando niveles de madurez tecnológica (TRL 8–9). Sin embargo, diversos estudios reportan elevados consumos energéticos y emisiones significativas de SO_2 asociadas a la tostación oxidante (Deng y col., 2020; Martínez y Delgado, 2022; Zhang y col., 2023). Estos factores limitan su sostenibilidad ambiental y aumentan los costos asociados al control de emisiones.

En contraste, las rutas hidrometalúrgicas operan a temperaturas moderadas y permiten mayor selectividad en la disolución del antimonio, reduciendo emisiones gaseosas directas y facilitando el tratamiento de minerales complejos y residuos secundarios (Li y col., 2021; Chen y col., 2021; Zhang y col., 2023). Aunque su nivel de madurez tecnológica es inferior (TRL 3–6 en tecnologías emergentes), representan una alternativa estratégica en contextos donde la sostenibilidad y la eficiencia ambiental son prioritarias.

En conjunto, la evidencia sugiere que el desarrollo futuro de la metalurgia del antimonio tenderá a integrar principios de química verde, optimización energética y reducción de impactos ambientales.

PURIFICACIÓN Y OBTENCIÓN DEL METAL BRILLANTE

La lixiviación genera soluciones enriquecidas con antimonio que requieren etapas posteriores de purificación y reducción para obtener el metal en estado sólido. Las técnicas más relevantes incluyen la electro-obtención y la electro-refinación, consideradas esenciales para la producción de antimonio de alta pureza (>99.5 %).

Los procesos convencionales han empleado electrolitos basados en fluoruros o cloruros ácidos, ampliamente documentados por López y col. (2019). No obstante, investigaciones recientes se han orientado al desarrollo de sistemas electrolíticos más benignos, como electrolitos basados en sulfonatos alcalinos y medios libres de cianuro, con el objetivo de reducir riesgos ambientales y mejorar la seguridad operativa (Fernández y col., 2023; Zhang, B. y col., 2024; Zhang, W. y col., 2024).

Estos avances tecnológicos permiten la obtención del denominado “metal brillante” con elevada pureza y menor huella ambiental, aspecto fundamental para aplicaciones de alto valor agregado, como la industria electrónica y de semiconductores.



CONCLUSIONES

Esta revisión consolida la evidencia de que la metalurgia del antimonio se encuentra en una fase de transición crítica. Las tecnologías convencionales, aunque eficaces, son ambientalmente insostenibles. Por el contrario, las rutas hidrometalúrgicas basadas en los principios de la química verde, particularmente la lixiviación con agentes orgánicos o haluros y la electrorefinación con electrolitos benignos, demuestran un potencial enorme para reducir el impacto ambiental de la industria.

Las tendencias futuras y direcciones de investigación prioritarias deben enfocarse en:

- Escalabilidad de procesos verdes: La investigación en antimonio debe migrar de estudios a escala de laboratorio al desarrollo y optimización de procesos continuos a escala piloto, abordando desafíos de ingeniería y economía.
- Integración e híbridos: Combinar las ventajas de piro-e hidrometalurgia del antimonio en procesos híbridos (ej., una tostación suave seguida de lixiviación verde selectiva) podría ofrecer un balance óptimo entre eficiencia y sostenibilidad.
- Economía circular: Implementar estrategias para la recuperación de antimonio a partir de residuos electrónicos y baterías agotadas (minería urbana), y el reciclaje interno de lixiviantes y electrolitos para minimizar el consumo de recursos vírgenes ((Li y col., 2025)
- Evaluación cuantitativa del ciclo de vida: Es crucial realizar ACV rigurosos para cuantificar y comparar objetivamente los beneficios ambientales de las nuevas tecnologías frente a las convencionales, complementado con la reevaluación de los yacimientos de antimonio existentes en el país para actualizar su potencial y factibilidad económica bajo criterios sostenibles ((Martínez y Delgado, 2022; Chen y col., 2016).
- Desarrollo de materiales: Investigar electrodos más resistentes a la corrosión y más eficientes para permitir el uso generalizado de reactivos alternativos en la lixiviación y refinación de antimonio, reduciendo así los costos de capital y operación.

La transición hacia una metalurgia del antimonio más verde no es solo una opción tecnológica, sino una necesidad ambiental y estratégica para asegurar

el suministro responsable de este metal crítico en el marco de una economía baja en carbono y circular.

AGRADECIMIENTOS

Lorena Galaviz Briones agradece al Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación del Estado de Coahuila (SECHITI) y a la Universidad Autónoma de Coahuila por el respaldo institucional y financiero otorgado para la realización del presente artículo de revisión desarrollado en el marco de su proyecto de tesis sobre procesos metalúrgicos sostenibles para metales estratégicos.

REFERENCIAS

- Álvarez Pelegry, E. & Blanco Álvarez, F. (Coords.). (2023). Las materias primas minerales en la transición energética y en la digitalización: El papel de la minería y la metalurgia. Madrid: Real Academia de Ingeniería de España. Disponible en: https://raing.es/pdf/eventos/las_materias_primas_minerales_raing.pdf
- Anastas, P.T. & Warner, J.C. (1998). Green chemistry: Theory and practice. Oxford: Oxford University Press. DOI: <https://doi.org/10.1093/oso/9780198506980.001.0001>
- Anderson, C.G. (2022). The metallurgy of antimony. *Chemie der Erde - Geochemistry*, 82(1): 125–126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2012.04.001>
- Chen, W., Zhang, L. & Wang, H. (2016). Alkaline leaching of antimony from stibnite concentrate: Kinetics and process optimization. *Hydrometallurgy*, 164: 118–125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hidromet.2016.06.014>
- Chen, W., Zhang, L., Wang, H. & Li, X. (2021). Lixiviación de antimonio de mineral de estibina en solución de KOH para la producción de piroantimonato de sodio: optimización sistemática y estudio cinético. *JOM: The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 73(3): 845–856. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04531-8>



- Comisión Europea (2020). Study on the critical raw materials for the EU. Luxembourg: Publications Office of the European Union. DOI: <https://data.europa.eu/doi/10.2873/11619>
- Deng, J., Li, X., Wang, Y. & Zhang, H. (2020). A review on pyrometallurgical extraction of antimony from primary resources: Current practices and evolving trends. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 41(6): 412–428. DOI: <https://doi.org/10.1080/08827508.2020.1739080>
- Jova Geology (2014). Antimonio (Antimony) mineral. Disponible en: <https://www.jovageology.com/2014/04/antimonio-antimony-mineral.html>. Fecha de consulta: 15 de noviembre de 2024.
- Li, Y., Xue, H., Taskinen, P., Jokilaakso, A., Tang, C., Jin, W., Rämä, M., Chen, Y. & Yang, S. (2021). Clean antimony production from stibnite concentrate with goethite residue co-treatment for zinc, iron, sulfur conservation. *Journal of Cleaner Production*, 315: 127847. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127847>
- Li, Y., Wang, X., Chen, H. & Zhang, K. (2025). Exploración del flujo de material de antimonio en el contexto de la transición energética: un análisis basado en escenarios. *Resources, Conservation and Recycling*, 222: 108432. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108432>
- López, C., Hernández, F. & Bravo, E. (2019). Procesos de refinación del antimonio. *Tecnología Minera*, 6(4): 33–47.
- Martínez, P. & Delgado, S. (2022). Evaluación ambiental de la extracción de antimonio. *Ingeniería Verde*, 9(2): 88–108.
- Van den Brink, S., Kleijn, R., Sprecher, B., Mancheri, N. & Tukker, A. (2022). Resilience in the antimony supply chain. *Resources, Conservation and Recycling*, 176: 106586. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106586>
- U.S. Geological Survey (2023). Mineral Commodity Summaries: Antimony. Disponible en: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/antimony-statistics-and-information>
- Ye, L., Li, X., Li, Y. & Tang, C. (2019). Environmentally friendly leaching of antimony from stibnite using citric acid as reagent. *Hydrometallurgy*, 185: 1–7. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr12030555>
- Zhang, Y., Li, H., Wang, X. & Chen, K. (2023). Ultrasound-enhanced alkaline leaching of antimony from stibnite ore: Process optimization and mechanism analysis. *Ultrasonics Sonochemistry*, 98: 106525. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106525>
- Zhang, B., Wang, S. & Chen, Y. (2024). Advances in non-cyanide electrowinning for sustainable antimony production. *Heliyon*, 10(11): e35300. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35300>

Zhang, W., Liu, H. & Santos, R.M. (2024). Sustainable approaches in antimony electrorefining: Recent developments and environmental perspectives. *REM - International Engineering Journal*, 77(2): 145–158. DOI: <https://doi.org/10.1590/0370-44672024780031>

INFLUENCIA DE LOS NANOTUBOS DE CARBONO DE PARED MÚLTIPLE (MWNT) EN LA RESISTENCIA AL DESGASTE DEL CERMET WC-Co

INFLUENCE OF MULTI-WALLED CARBON NANOTUBES (MWNTS) ON THE WEAR RESISTANCE OF WC-Co CERMETS

SAN MIGUEL IZA, Isabela ¹

FALCÓN FRANCO, Lázaro Abdiel ¹

GARCÍA VILLARREAL, Sergio ¹

RODRÍGUEZ PULIDO, Alicia ²

RESUMEN

Los cermets de WC-Co son materiales críticos en aplicaciones de herramientas de corte y minería, pero su susceptibilidad al desgaste limita su vida útil en condiciones extremas. La incorporación de nanotubos de carbono de pared múltiple (MWNT) como refuerzo ha emergido como una estrategia prometedora para mejorar su desempeño tribológico. Este artículo sintetiza hallazgos recientes (2019-2024) sobre los mecanismos de refuerzo, métodos de procesamiento y mejoras en propiedades tribológicas de composites WC-Co- MWNT. El análisis revela que una dispersión efectiva y una interfaz fuerte son cruciales para lograr mejoras significativas en la resistencia al desgaste, mediante mecanismos de puenteo de grietas y lubricación sólida.

Palabras clave: tribología; dispersión; refuerzo; interfaz; microestructura; tenacidad.

ABSTRACT

WC-Co cermets are critical materials in cutting tool and mining applications, but their susceptibility to wear limits their service life under extreme conditions. The incorporation of multi-walled carbon nanotubes (MWNTS) as reinforcement has emerged as a promising strategy to enhance their tribological performance. This article synthesizes recent findings (2019–2024) on reinforcement mechanisms, processing methods, and improvements in the tribological properties of WC-Co- MWNTS composites. The analysis reveals that effective dispersion and strong interfacial bonding are crucial for achieving significant enhancements in wear resistance, through mechanisms such as crack bridging and solid lubrication.

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

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

Correspondencia
isabelaiza@uadec.edu.mx
<https://orcid.org/0009-0006-5178-8848>
Fecha de recepción
18 de noviembre de 2025.
Fecha de aceptación
12 de marzo de 2026.

Keywords: *tribology; dispersion; reinforcement; interface; microstructure; toughness.*

I. INTRODUCCIÓN

Los cermets de carburo de wolframio-cobalto (WC-Co) constituyen materiales esenciales en la industria manufacturera y minera debido a su excepcional combinación de dureza y tenacidad (Wang y col., 2024). Sin embargo, en condiciones de servicio severas, estos materiales presentan limitaciones como la propagación de grietas y el desgaste acelerado, lo que reduce significativamente su vida útil (Yan y col., 2019; Staia y col., 2023).

La morfología inicial de los polvos comerciales WC-12Co, mostrada en la Figura 1, permite apreciar la distribución y el tamaño de las partículas antes de su procesamiento. Esta característica microestructural influye directamente en la compactación y homogeneidad del material resultante y el comportamiento mecánico final del cermet.

La incorporación de nanomateriales carbonáceos, en particular nanotubos de carbono de pared múltiple (MWNT), ha surgido como una solución innovadora para superar estas limitaciones (Nie y col., 2023).

Los MWNT poseen propiedades mecánicas excepcionales y capacidad de lubricación sólida, lo que los convierte en refuerzos ideales para composites de matriz cerámica-metálica. Estudios recientes han demostrado que la adición controlada de MWNT puede mejorar simultáneamente la tenacidad a la fractura y la resistencia al desgaste de los cermets WC-Co (Stia y col., 2023). Esta revisión analiza críticamente el estado del arte en el desarrollo de composites WC-Co- MWNT, con énfasis en los avances recientes, los mecanismos de refuerzo y las perspectivas futuras.

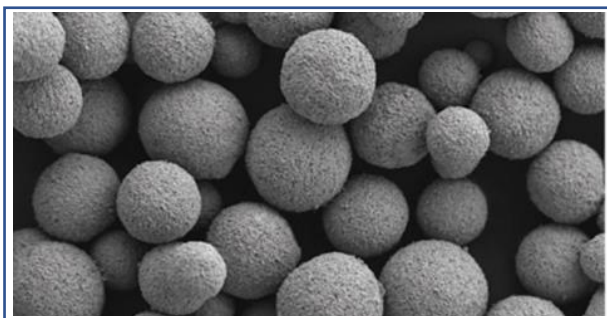


Figura 1. Morfología de polvos de WC – 12Co.
(Sun, 2021)

La presente revisión bibliográfica se desarrolló mediante una búsqueda de literatura científica en bases de datos especializadas, principalmente en Scopus, Web of Science y MDPI. Se consideraron artículos publicados entre los años 2019 y 2025, que están enfocados en la fabricación de cermets WC-Co y materiales compuestos reforzados con nanotubos de carbono, considerando principalmente los mecanismos de dispersión, métodos de fabricación, los cambios en su microestructura, comportamiento tribológico y las propiedades mecánicas.

Se seleccionaron estudios originales y revisiones arbitradas que analizan la incorporación de nanotubos de carbono de pared múltiple y otros nanomateriales carbonosos en matrices cerámicas o metálicas, así como investigaciones relacionadas con diferentes métodos de procesamiento, como la sinterización convencional y SPS, y la molienda mecánica, y su efecto en las propiedades del material.

La información recopilada fue analizada de manera crítica y comparativa, lo que permitió identificar tendencias actuales, avances relevantes, limitaciones asociadas a la dispersión de los nanotubos y cambios microestructurales que afectan la resistencia al desgaste de los compuestos WC-Co reforzados con nanomateriales.

DESARROLLO Y DISCUSIÓN

MECANISMOS DE REFUERZO, LA MATRIZ WC-CO Y SUS DESAFÍOS TRIBOLÓGICOS

El cermet WC-Co consiste en una fase cerámica dura (WC) embebida en una matriz metálica dúctil (Co), lo que confiere una combinación única de dureza y tenacidad. No obstante, bajo condiciones de carga cíclica y a altas temperaturas, estos materiales son susceptibles a fallos por fractura frágil de los granos de WC y por deformación plástica de la fase Co (Jiang y col., 2022). Los mecanismos de desgaste predominantes incluyen abrasión, adhesión y fatiga superficial, que se ven exacerbados por la liberación de partículas de WC que actúan como abrasivos en un proceso de desgaste de

tres cuerpos. La mejora de la tenacidad frente a la fractura se ha identificado como un factor crucial para prolongar la vida útil de estos materiales en aplicaciones tribológicas exigentes.

La microestructura característica de estos cermets se observa en la Figura 2, donde las micrografías obtenidas por microscopía electrónica de barrido (MEB) muestran la distribución de los granos duros de WC dentro de la matriz metálica de Co. Esta distribución microestructural está relacionada con el comportamiento mecánico del material, ya que la fractura frágil tiende a originarse en los granos de WC, mientras que la fase Co actúa como ligante dúctil capaz de deformarse plásticamente y absorber energía antes de la propagación de la grieta.

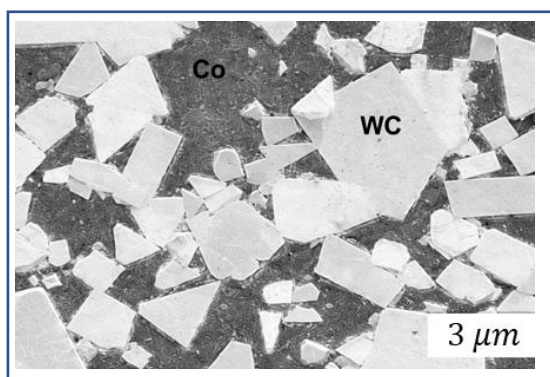


Figura 2. Micrografías MEB de matriz de WC – Co. (Coureaux, 2015)

MECANISMOS DE REFUERZO CON MWNT

Los MWNT actúan como refuerzos eficaces en matrices de WC-Co mediante múltiples mecanismos sinérgicos. El mecanismo principal identificado es el puenteo de grietas, en el que los MWNT que atraviesan los planos de fisura transfieren carga lejos de la punta de la grieta, lo que aumenta la energía requerida para su propagación (Tan y col., 2022). Adicionalmente, se ha observado que los MWNT promueven la desviación de las grietas a través de su interfaz con la matriz, aumentando la rugosidad de la fractura y disipando energía mediante mecanismos de extracción y deslizamiento interfaciales. Estudios de microscopía electrónica han confirmado que los MWNT permanecen intactos después de la consolidación, actuando como barreras efectivas contra la propagación de grietas (Yan y col., 2019).

La morfología característica de los nanotubos de carbono de pared múltiple (MWNT), mostrada en la Figura 3, evidencia su estructura tubular concéntrica



y su elevada relación de aspecto, propiedades geométricas que benefician los mecanismos de puenteo y desviación de grietas previamente descritos.

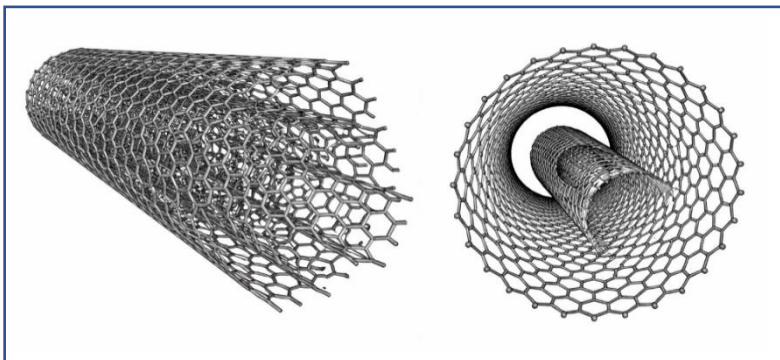


Figura 3. Nanotubos de pared múltiple MWNT.
(Adaptado de Lamnini, 2023).

PROPIEDADES TRIBOLÓGICAS

La incorporación de MWNT ha demostrado mejoras significativas en el comportamiento tribológico de los composites WC-Co. En un estudio sobre recubrimientos de WC con adición de 0,35 % de nanotubos de carbono, aplicados mediante rocío por llama (flame spray) sobre acero, se observó que la resistencia al desgaste del material recubierto aumentó en torno al 50 % en comparación con el recubrimiento sin CNT. Asimismo, la tasa de desgaste se redujo en el recubrimiento WC- CNT (Sunoto y col., 2020). El mecanismo de lubricación sólida juega un papel crucial, donde los MWNT exfoliados durante el desgaste forman una capa tribológica protectora que reduce el coeficiente de fricción. Análisis de superficies desgastadas mediante espectroscopía Raman han confirmado la presencia de grafeno derivado de MWNT en la interfaz de contacto, actuando como lubricante sólido (Zhang y col., 2022).

PROCESAMIENTO Y OPTIMIZACIÓN DE COMPOSITES

WC-CO-MWNT

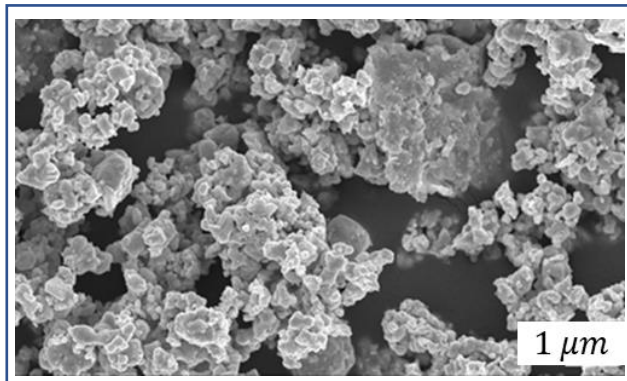
La incorporación de los MWNT en los cermets WC-Co no puede realizarse sin superar los desafíos significativos asociados a su procesamiento. El problema principal es la fuerte tendencia de los MWNT a aglomerarse debido a sus fuerzas de van der Waals, lo que conduce a defectos de fabricación que



actúan como concentradores de tensiones y degradan las propiedades mecánicas (Zhang y col., 2022).

En este contexto, el proceso de molienda de bolas resulta determinante para lograr una distribución adecuada de las fases en el sistema WC-Co-MWNT. La Figura 4 muestra la morfología de los polvos WC-Co después de la molienda de bolas y evidencia la importancia del proceso de dispersión, lo que se observa en la distribución de las fases y en la homogeneidad elemental, demostrada mediante análisis EDS.

Figura 4. Morfología de polvos de WC – Co después de la molienda de bolas, espectroscopía de rayos X por dispersión de energía (EDS) (Zhang, 2022).



ESTRATEGIAS DE DISPERSIÓN DE MWNT

La molienda de bolas se consolida como la técnica más efectiva para la dispersión de MWNT en matrices de WC-Co, demostrando superioridad en la desagregación de aglomerados y distribución homogénea dentro de la matriz. En estudios realizados, se ha observado que un tiempo de molienda de seis a ocho horas y una relación bolas-polvo de aproximadamente 10:1 favorecen la dispersión homogénea y el refinamiento de partículas, utilizando medios líquidos, como el etanol, para mejorar la homogeneidad y evitar daños estructurales en los nanotubos (Wang y col., 2022). Esta ventana temporal optimizada equilibra la eficacia de la desagregación con la preservación de la integridad estructural de los nanotubos, evitando el acortamiento excesivo que ocurre con tiempos de molienda prolongados.

La energía de impacto controlada durante este período de 6-8 horas no solo separa eficientemente los aglomerados de MWNT, sino que, adicionalmente, activa superficialmente los nanotubos, favoreciendo su adhesión a las partículas de WC-Co. Investigaciones han mostrado que tiempos de molienda insuficientes pueden resultar en una dispersión incompleta de los nanotubos de carbono, mientras que tiempos prolongados pueden inducir defectos

estructurales y reducir la relación de aspecto de los MWNT, lo que disminuye sus propiedades reforzantes (Li y col., 2023).

Como alternativa complementaria, la funcionalización química de MWNT con grupos carboxílicos ha mostrado resultados prometedores en aplicaciones específicas en las que se requiere una compatibilidad interfacial mejorada (Yang y col., 2024). Sin embargo, este método presenta limitaciones significativas en escalado industrial debido a la generación de efluentes químicos y posibles daños estructurales en los nanotubos durante los procesos de funcionalización ácida.

La combinación sinérgica de molienda de bolas, seguida de recubrimiento autocatalítico con níquel, ha emergido como la estrategia más eficiente, logrando simultáneamente una dispersión óptima y una interfaz reforzada (Gao y col., 2023). Esta aproximación híbrida permite preservar la integridad estructural de los MWNT y asegurar una transferencia de carga eficaz entre la matriz y el refuerzo, maximizando las propiedades tribológicas del composite final.

TÉCNICAS DE CONSOLIDACIÓN Y ESTABILIDAD

TÉRMICA

El sinterizado por descarga de plasma (SPS) se ha establecido como la técnica de consolidación preferida para composites WC-Co- MWNT debido a su capacidad para preservar la integridad estructural de los nanotubos. Estudios comparativos han demostrado que el SPS a 1000-1200 °C permite una densificación completa mientras mantiene la estructura gráfica de los MWNT (Buravleva y col., 2022).

En contraste, la sinterización convencional en horno a temperaturas controladas (600 a 1300 °C) permite mantener la integridad estructural de los nanotubos de carbono, gracias al control preciso de la actividad de carbono, lo que previene la degradación oxidativa (Zhang y col., 2013). El grafito actúa como sacrificio térmico, oxidándose, protegiendo así los MWNT durante la etapa crítica de sinterizado a temperaturas elevadas (Huang y col., 2025).



CONFIGURACIÓN SISTEMA DE ENCAPSULAMIENTO (CHAROLA-ALÚMINA-GRAFITO) PARA SINTERIZACIÓN CONVENCIONAL

El sistema de control atmosférico emplea una charola de alúmina de alta pureza (99.7 % de Al_2O_3) que actúa como contenedor primario, rodeada por una cámara de grafito que funciona como getter de oxígeno y regulador del potencial de carbono. Estudios demuestran que esta configuración mantiene una presión parcial de oxígeno entre 10^{-15} y 10^{-18} atm a 1400 °C, lo que crea condiciones reductoras óptimas (Bocanegra-Bernal y col., 2023).

Mecanismos de protección térmica

- Charola de alúmina: Provee estabilidad química y previene contaminación por sílice
- Cama de grafito granular: Absorbe oxígeno residual y regula actividad de carbono ($a_c \approx 0.8-0.9$)
- Tapa sellada con pasta cerámica: Crea microatmósfera controlada dentro del conjunto

Perfil térmico optimizado

- Rampa inicial: 10 °C/min hasta 800°C para eliminación de lubricantes
- Rampa intermedia: 3 °C/min hasta 1000 °C para transformaciones de fase
- Rampa final: 3 °C/min hasta temperatura de sinterizado (1380-1420 °C)
- Mantenimiento: 60 minutos para densificación completa
- Enfriamiento: 5 °C/min hasta temperatura ambiente

CONTROL DE INTERFAZ Y MICROESTRUCTURA

La ingeniería de la interfaz entre MWNT y matriz es crítica para optimizar las propiedades mecánicas del compuesto. Investigaciones recientes han demostrado que la adición controlada de carburo de cromo (Cr_3C_2) como inhibidor del crecimiento de grano refina simultáneamente la microestructura y promueve una interfaz más fuerte entre las MWNT y la matriz WC-Co (Yin y col., 2020). La caracterización mediante microscopio electrónico de



transmisión (TEM) ha revelado que interfaces coherentes con formación controlada de carburos favorecen una transferencia de carga efectiva, mientras que interfaces débiles resultan en deslizamiento y extracción de los nanotubos bajo carga.

EVOLUCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El análisis bibliométrico revela un crecimiento exponencial en la investigación sobre composites WC-Co- MWNT durante el período 2019-2024. El número de publicaciones anuales se ha triplicado, con un pico notable a partir de 2022, lo que refleja el creciente interés en estos nanocompuestos para aplicaciones avanzadas. China lidera la producción científica con aproximadamente el 55 % de las publicaciones, seguida por India, Irán y Corea del Sur. Esta distribución geográfica coincide con regiones de intensa actividad manufacturera y programas nacionales de desarrollo de materiales avanzados.

REDES DE COLABORACIÓN Y TEMAS EMERGENTES

El mapeo de co-citación identifica tres grupos principales de investigación: (1) procesamiento y sinterización de nanocompuestos, (2) caracterización tribológica y mecánica, y (3) ingeniería de interfaces y funcionalización. La tendencia más destacada en publicaciones recientes es el enfoque en composites híbridos que combinan MWNT con otros nanomateriales, como el grafeno o el nitruro de boro. Estos sistemas híbridos buscan sinergias entre diferentes mecanismos de refuerzo para lograr mejoras multifuncionales en propiedades mecánicas y tribológicas.

Métodos de caracterización avanzada

Las técnicas de caracterización han evolucionado significativamente, con un creciente uso de métodos in situ para estudiar los mecanismos de refuerzo. La tomografía de sonda atómica (APT) combinada con el microscopio electrónico de transmisión (TEM) ha permitido caracterizar la química interfacial a escala atómica, revelando la difusión controlada de elementos de la matriz hacia los MWNT durante la sinterización (Koelling y col., 2024). Simultáneamente, el uso de ensayos tribológicos in situ con monitorización acústica ha proporcionado nuevos conocimientos sobre la formación y la estabilidad de la capa tribológica durante el desgaste.



Tabla 3. Investigaciones actuales sobre WC-Co y nanotubos de carbono con aplicaciones en recubrimientos, tribología y sinterizado.

#	Título	Aplicación	Referencia
1	Optimización del polvo base WC-25Co y de los parámetros para deposición de energía dirigida por láser	Fabricación aditiva; recubrimientos para herramientas	Li y col. (2024)
2	Seguimiento de planos atómicos mediante tomografía por sonda de átomos	Caracterización avanzada de materiales	Yang y col. (2024)
3	Efecto de la potencia láser en la microestructura y propiedades de recubrimientos WC-12Co depositados por deposición de energía dirigida con láser	Ingeniería de superficies; recubrimientos duros	Li y col. (2023)
4	Avances en materiales nanoestructurados a base de grafeno: síntesis, estructura, dispersión y aplicaciones tribológicas	Tribología; materiales compuestos	Nie y Bahrami (2023)
5	Dispersión a nanoescala de nanotubos de carbono en matrices metálicas para mejorar la conductividad térmica y eléctrica mediante molienda mecánica	Nanocompuestos metálicos conductores	Gao y col. (2023)
6	Efecto de los nanotubos de carbono en las propiedades mecánicas de compuestos con matriz de aluminio: una revisión	Refuerzo de compuestos metálicos	Staia y col. (2023)
7	Mejora en la dispersión de nanotubos de carbono mediante molienda mecánica para la preparación de nanocompuestos epóxicos funcionales	Materiales poliméricos avanzados	Zhang y col. (2022)
8	Desempeño tribocorrosivo de recubrimientos HVOF de WC-12Co reforzados con nanotubos de carbono	Recubrimientos resistentes al desgaste y a la corrosión	Li y col. (2022)
9	Efecto de la adición de óxido de grafeno en las propiedades tribológicas de compuestos WC-Co	Mejora de dureza y resistencia al desgaste	Li y col. (2024)
10	Compuestos WC-Co reforzados con plaquetas de grafeno con propiedades mecánicas, tribológicas y térmicas mejoradas	Compuestos de alto rendimiento para herramientas	Yang y col. (2024)

Direcciones de investigación emergentes

Las tendencias futuras identificadas apuntan al desarrollo de composites inteligentes y multifuncionales. La funcionalización de MWNT con sensores integrados permitiría el monitoreo in situ del estado de daño durante el servicio (Chua y col., 2022). Paralelamente, la fabricación aditiva de composites WC-Co- MWNT mediante técnicas como la deposición de energía dirigida (DED) emerge como un campo prometedor para la fabricación de componentes complejos con refuerzo localizado (Li, W.y col., 2024; Nunes,



H. y col., 2024). Otra dirección importante es el desarrollo de composites sostenibles mediante la sustitución parcial de Co por aglutinantes alternativos y el uso de MWNT provenientes de fuentes renovables.

Retos tecnológicos y oportunidades

Los principales retos identificados incluyen el escalado industrial de los métodos de dispersión, el control preciso de la orientación de MWNT en componentes complejos, y la reducción de costos de producción. Sin embargo, las oportunidades son significativas, en particular en aplicaciones de alta gama, como herramientas de corte para materiales difíciles de mecanizar, componentes para la industria aeroespacial e implantes ortopédicos de alta durabilidad (Chan y col., 2021). La integración de inteligencia artificial en el diseño y optimización de microestructuras representa otra frontera emergente con potencial disruptivo.

CONCLUSIONES

La incorporación de nanotubos de carbono de pared múltiple (MWNT) en los cermetes de carburo de wolframio-cobalto (WC-Co) se ha consolidado como una estrategia eficaz en cuanto a resistencia al desgaste y tenacidad a la fractura.

Para obtener estos beneficios, resulta esencial garantizar una dispersión homogénea de los MWNT dentro de la matriz y una interfaz fuerte y estable entre las fases cerámica y metálica. La molienda de bolas controlada se ha consolidado como una de las técnicas más eficaces para lograr una distribución uniforme de los nanotubos sin comprometer su integridad estructural.

Las tendencias actuales reflejan el creciente interés de la comunidad científica e industrial en este tipo de materiales, y se centra en la optimización de los procesos de fabricación, la ingeniería de interfaces y el desarrollo de composites híbridos, en los cuales los MWNT se combinan con otros nanorefuerzos para potenciar las propiedades mecánicas, térmicas y tribológicas.



Los composites WC–Co reforzados con MWNT constituyen una nueva generación de materiales de ingeniería con un alto potencial de aplicación en sectores estratégicos como la industria aeroespacial, automotriz, minera y biomédica. Su implementación a gran escala sigue enfrentando desafíos importantes, entre ellos el control microestructural, la orientación de los nanotubos y la reducción de los costos de procesamiento. Superar estas limitaciones exigirá aplicar inteligencia artificial y optimización de procesos para acelerar su paso del laboratorio a la industria y consolidar a los nanocompuestos WC–Co– MWNT como materiales avanzados del futuro.

REFERENCIAS

- Bocanegra-Bernal, M. H., García-Reyes, A., Domínguez-Ríos, C., Reyes-Rojas, A., Aguilar-Elguézabal, A., & Echeberria, J. (2020). Towards improving low-temperature degradation of zirconia/alumina ceramics via in-situ formation of an Al_2O_3 functional surface layer through sintering in the presence of graphite powder. *Journal of Alloys and Compounds*, 818: 152840. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152840>
- Buravleva, A. A., Fedorets, A. N., Vornovskikh, A. A., Ognev, A. V., Nepomnyushchaya, V. A., Sakhnevich, V. N., Lembikov, A. O., Kornakova, Z. E., Kapustina, O. V., Tarabanova, A. E., Reva, V. P., & Buravlev, I. Y. (2022). Spark plasma sintering of WC-based 10 wt.% Co hard alloy: A study of sintering kinetics and solid-phase processes. *Materials*, 15(3): 1091. <https://doi.org/10.3390/ma15031091>
- Chan, K. F., Zaid, M. H. M., Mamat, M. S., Liza, S., Tanemura, M., & Yaakob, Y. (2021). Recent developments in carbon nanotubes-reinforced ceramic matrix composites: A review on dispersion and densification techniques. *Crystals*, 11(5): 457. <https://doi.org/10.3390/cryst11050457>
- Chua, C. S., Ow, S. Y., & Wang, S. (2022). 3D printing of fibre-reinforced ceramic composites with hierarchical structure. *International Materials Reviews*, 67(2): 67–90. <https://doi.org/10.1080/17436753.2021.2014276>
- Coureaux M., D., Sagaró Z., R., Mestra R., Á., Calzadilla R., J., & Llanes P., L. (2015). Influence of microstructure in the tribological behavior of cemented carbides (WC–Co) boronized. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 23(2), 259–268. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052015000200010>



- Gao, Z., Han, Q., Liu, J., Zhao, K., Yu, Y., & Feng, Y. (2023). Dispersion of carbon nanotubes improved by ball milling to prepare functional epoxy nanocomposites. *Coatings*, 13(3): 649. <https://doi.org/10.3390/coatings13030649>
- Huang, Y., Wang, L., Zhang, X., & Li, J. (2025). Bioinspired carbon nanotube/graphite oxide/epoxy interlaminar region for simultaneously strengthening and toughening glass fiber fabric/epoxy composites. *Composites Part B: Engineering*, 303, 111982. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2025.112867>
- Jiang, J., Ouyang, S., Chen, H., Guo, S., Yin, L., Tan, Z., Shi, H., Zhong, Z., & Qiu, L. (2022). Effect of MWCNTs on microstructure and properties of WC–9Co gradient cemented carbides. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 48: 19295–19304. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.03.223>
- Koelling, S., Assali, S., Nadal, G., Isheim, D., Seidman, D. N., & Moutanabbir, O. (2024). Tracking of atomic planes in atom probe tomography. *Journal of Applied Physics*, 136(24): 245103. <https://doi.org/10.1063/5.0226890>
- Lamnini, S., Pugliese, D., & Baino, F. (2023). Zirconia-based ceramics reinforced by carbon nanotubes: A review with emphasis on mechanical properties. *Ceramics*, 6(3), 1705–1734. <https://doi.org/10.3390/ceramics6030105>
- Li, B., Zhou, L., Wang, B., Yin, M., Qian, Y., Shi, X., Guo, Z., Han, Z., Hu, N., & Sun, L. (2023). Nanoscale dispersion of carbon nanotubes in a metal matrix to boost thermal and electrical conductivity via facile ball milling techniques. *Nanomaterials*, 13(20): 2815. <https://doi.org/10.3390/nano13202815>
- Li, M., Song, Z., Gong, M., Mo, D., Wang, L., Dusza, J., & Zhang, C. (2022). WC–Co–graphene platelet composites with improved mechanical, tribological and thermal properties. *Ceramics International*, 47: 23371–23380. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.07.266>
- Li, W., Yang, H., Liu, Y., Li, F., Yi, J., & Eckert, J. (2024). Effect of laser power on microstructure and properties of WC–12Co composite coatings deposited by laser-based directed energy deposition. *Materials*, 17(17): 4215. <https://doi.org/10.3390/ma17174215>
- Nie, X., & Bahrami, A. (2023). Effect of carbon nanotubes on mechanical properties of aluminum matrix composites: A review. *Science and Engineering of Composite Materials*, 31: 1–15. <https://doi.org/10.1515/secm-2024-0009>
- Nunes, H., Nhang, J., Regueiras, L., Reis, A., Vieira, M. F., Guimarães, B., Figueiredo, D., Fernandes, C., & Emadinia, O. (2025). Optimising WC–25Co feedstock and parameters for laser-directed energy deposition. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 9(8): 279. <https://doi.org/10.3390/jmmp9080279>
- Staia, M. H., Mejías, A., Kossman, S., & Puchi-Cabrera, E. S. (2023). Tribocorrosion performance of WC–12Co HVOF-sprayed coatings reinforced with carbon nanotubes. *Crystals*, 13(3): 457. <https://doi.org/10.3390/cryst13030457>

- Sun, N., & Lei, J. (2021). *Effect of WC–12Co addition on microstructure and wear resistance of Inconel 625 matrix composites prepared by laser cladding*. *Chinese Journal of Lasers*, 48(6), 0602106.
- Sunoto Mudiantoro, M., Gerry, M., Winarto, W., Anis, M., Kemal, M., & Fadzli, M. (2020). Surface mechanical properties of tool steel with the addition of carbon nanotubes in flame-sprayed tungsten carbide coatings. *Materials Science Forum*, 1000: 238–247. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1000.238>
- Tan, W., & Martínez-Pañeda, E. (2022). Phase-field fracture predictions of microscopic bridging behaviour of composite materials. *Composite Structures*, 286: Article 115242. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2201.03066>
- Wang, Y., Xiang, F., Yuan, X., Yang, B., Wang, F., & Li, Y. (2022). Effects of processing parameters on the microstructure and mechanical properties of nanoscaled WC–10Co cemented carbide. *Materials*, 15(13): 4472. <https://doi.org/10.3390/ma15134472>
- Yan, X., Wang, S., Wen, D., Wang, G., & Liu, W. (2019). Effects of HfC particles on crack initiation and propagation behavior of WC/Co composites. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 37(3): 628–635. <https://doi.org/10.1051/jnwpu/20193730628>
- Yang, K., Chen, H., Li, Z., Wang, Y., Li, B., Wang, C., Qiu, S., & Chen, F. (2024). Advanced research on graphene-based nanomaterials: Synthesis, structure, dispersibility, and tribological applications. *Chemical Engineering Journal*, 11: Article e202400428. <https://doi.org/10.1002/cnma.202400428>
- Yin, C., Ruan, J., Du, Y., Long, J., Peng, Y., & Li, K. (2020). Effects of Cr₃C₂, VC, and TaC on microstructure, WC morphology, and mechanical properties of ultrafine WC–10 wt.% Co cemented carbides. *Metals*, 10(9): 1211. <https://doi.org/10.3390/met10091211>
- Zhang, D., Wang, B., & Ji, Y. (2013). The influence of sintering temperature on the mechanical properties and microstructure of carbon nanotubes/zirconia/hydroxyapatite biocomposites. *Applied Mechanics and Materials*, 423–426: 38–42. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.423-426.38>
- Zhang, X., Zhang, J., & Ding, J. (2022). Effect of graphene oxide addition on tribological properties of WC–Co cemented carbide. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 109: 105962. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2022.105962>