UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE COAHUILA

RIIIT REVISTA INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÒN E INNOVACIÒN TECNÒLOGICA

UA DE C DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

RIIIT Divulgación
Bimestre: noviembre - diciembre 2026
Año: 14, No.: 83



Plantas del Desierto Chihuahuense: Aliados en la Lucha Contra Microorganismos Fitopatógenos

Dávila-Medina, M.D., Medina-Morales, M.A., Ríos-González, L.J., Arredondo-Valdés, R., Laredo-Alcalá, E.I., Flores-Olivas, A., Cruz-Requena, M.



Potencial terapéutico de *Hamelia patens* Jacq. en la prevención de la dislipidemia en el síndrome metabólico

Rangel-Vázquez, G., Reyes-Munguía, A., Cariño-Cortés, R., Alvarado-Sánchez, B.



Entre cielo, mar y tierra: la duna costera en el Caribe mexicano

Gayosso-Soto, E., Cohuo, S., Tello-Chan, J.M., Hernández-Hernández, P., Huix, C.M.



Números Intervalares y su Aritmética: Describir magnitudes y operarlas de acuerdo al razonamiento natural del ser humano

Cazarez-Castro, N.R., Cabral-Rosetti, L.G.



Comparación de los métodos de reciclaje empleados en los módulos fotovoltaicos de c-Si

Cabrera-Hernández, M., Ramírez-Amador, R., Jiménez-Xochimitl, S., Cortés-Maldonado, R., López-Hernández, O.



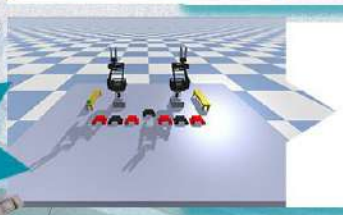
Modelos energéticos internacionales como base para el diseño de estrategias de transición energética en la Región Carbonífera de Coahuila

Lucas-Rodríguez, C., Torres-León, C., Robles-Quintanilla, D.E., Aguirre-Joya, J.A.



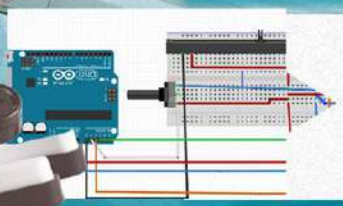
Inteligencia computacional en la sincronización de sistemas dinámicos

Pulido-Luna, J.R., López-Rentería, J.A., Cárdenas-Maciel, S.L., Cazarez-Castro, N.R.



Desarrollo de solucionador basado en gemelos digitales para simulación y control de brazo robótico Dorna®

Elizalde-Vega, Á.D., Bringas-Posadas, D., Cruz-González, C.E., Guzmán-Flores, I. Velázquez-Mora, R.



Herramienta didáctica interactiva con Arduino utilizando lógica difusa para la enseñanza de sistemas de ecuaciones lineales en Excel

Hernández-Miramontes, B.V., Serranos-Pérez, E, Soberanes-Martín, A.

Indexada por: Índice de Revistas Mexicanas de Divulgación Científica y Tecnológica.

CONAHCYT

RIIIT Divulgación
Bimestre: Noviembre - Diciembre 2026
Año 14, No. 83

Cintillo Legal

RIIIT REVISTA INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN TECNOLÓGICA, Año. 14, **No.** 83. noviembre - diciembre 2026, es una publicación bimestral editada y publicada por Universidad Autónoma de Coahuila, boulevard Venustiano Carranza s/n colonia República Oriente, C.P. 25280, Saltillo, Coahuila, Tel. (844) 414 85 82, https://riiit.com.mx/, correo electrónico: publicacionesriiit@uadec.edu.mx. Editor responsable: Dra. Antonia Mtz. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2022-021512364600-102, ISSN: 2007-9753, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Departamento de Divulgación y Comunicación Digital de la Dirección de Investigación y Posgrado de la UAdeC, Q.F.B. Fernando García, Edificio "D" planta alta, unidad Camporredondo, Saltillo, Coahuila, C.P. 25280, Tel. (844) 414 85 82, fecha de última modificación: 01 Noviembre 2026.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.
Queda prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de Universidad Autónoma de Coahuila.

Tabla de Contenido

Título artículo/ Autores	Páginas
Plantas del Desierto Chihuahuense: Aliados en la Lucha Contra Microorganismos Fitopatógenos Dávila-Medina, M.D., Medina-Morales, M.A., Ríos-González, L.J., Arredondo-Valdés, R., Laredo-Alcalá, E.I., Flores-Olivas, A., Cruz-Requena, M.	1 – 26
Potencial terapéutico de Hamelia patens Jacq. en la prevención de la dislipidemia en el síndrome metabólico Rangel-Vázquez, G., Reyes-Munguía, A., Cariño-Cortés, R., Alvarado-Sánchez, B.	27 - 38
Entre cielo, mar y tierra: la duna costera en el Caribe mexicano Gayosso-Soto, E., Cohuo, S., Tello-Chan, J.M., Hernández-Hernández, P., Huix, C.M.	39 – 54
Números Intervalares y su Aritmética: Describir magnitudes y operarlas de acuerdo al razonamiento natural del ser humano Cázarez-Castro, N.R., Cabral-Rosetti, L.G.	55 – 70
Comparación de los métodos de reciclaje empleados en los módulos fotovoltaicos de c-Si Cabrera-Hernández, M., Ramírez-Amador, R., Jiménez-Xochimitl, S., Cortés-Maldonado, R., López-Hernández, O.	71 – 89
Modelos energéticos internacionales como base para el diseño de estrategias de transición energética en la Región Carbonífera de Coahuila Lucas-Rodríguez, C., Torres-León, C., Robles-Quintanilla, D.E., Aguirre-Joya J.A.	90 - 107
Inteligencia computacional en la sincronización de sistemas dinámicos Pulido-Luna, J.R., López-Rentería, J.A., Cárdenas-Maciel, S.L., Cazarez-Castro, N.R.	108 - 116
Desarrollo de solucionador basado en gemelos digitales para simulación y control de brazo robótico Dorna® Elizalde-Vega, Á.D., Bringas-Posadas, D., Cruz-González, C.E., Guzmán-Flores, I., Velázquez-Mora, R.	117 - 132
Herramienta didáctica interactiva con Arduino utilizando lógica difusa para la enseñanza de sistemas de ecuaciones lineales en Excel Hernández-Miramontes, B.V., Serranos-Pérez, E, Soberanes-Martín, A.	133 - 154

Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Plantas del Desierto Chihuahuense: Aliados en la Lucha Contra Microorganismos Fitopatógenos

Chihuahuan Desert Plants: Allies in the Fight Against Phytopathogenic Microorganisms

Dávila-Medina, M.D.[1], Medina-Morales, M.A.[1], Ríos-González, L.J.[1], Arredondo-Valdés, R.[1], Laredo-Alcalá, E.I.[2], Flores-Olivas, A.[3], Cruz-Requena, M.[3]*

[1] Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila. Blvd. V. Carranza e Ing. José Cárdenas V. s/n. Col. República Ote, Saltillo, Coahuila, México, C.P. 25280. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8897-0375, https://orcid.org/0000-0002-7142-6063, https://orcid.org/0000-0002-3398-8014, https://orcid.org/0000-0003-4093-0707.
[2] Centro de Investigación para la Conservación de la Biodiversidad y Ecología de Coahuila, Universidad Autónoma de Coahuila. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0957-787X.
[3] Departamento de Parasitología, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, C.P. 25315. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5641-4064, https://orcid.org/0000-0002-6146-6010*.
desireedavila@uadec.edu.mx; miguel.medina@uadec.edu.mx; leopoldo.rios@uadec.edu.mx; r-arredondo@uadec.edu.mx; elan_laredo@uadec.edu.mx; aflooli50@gmail.com; marisolcrequena@gmail.com*

Innovación tecnológica: Revisión de información actual y relevante sobre la aplicación de extractos de plantas sobre diferentes microorganismos fitopatógenos.

Área de aplicación industrial: Agrícola, microbiología, alimentaria, biotecnológica.

Recibido: 16 mayo 2025
Aceptado: 26 junio 2026

Abstract

The Chihuahuan Desert boasts a wide variety of plant species, such as creosote bush (*Larrea tridentata), hojasen (Flourensia cernua*), and lechuguilla agave (*Agave lechuguilla*), which have adapted to the harsh climatic conditions characteristic of this region. One of the keys to these plants' survival has been the synthesis of various secondary metabolites, including polyphenols, terpenes, and flavonoids. These compounds protect the plants from abiotic and biotic factors, enabling their adaptation to their environment. Due to their biological properties, these secondary metabolites, also known as bioactive compounds, have found diverse applications in various fields, such as agriculture, where their antimicrobial activity against several genera of phytopathogenic fungi and bacteria has been established. This literature review was conducted through a systematic search of Google Scholar, PubMed, SciELO, and Scopus databases, using

keywords such as microbiology, bioactive compounds, and plants of the Chihuahuan Desert. The objective of this review is to describe the potential of bioactive compounds present in plants of the Chihuahuan Desert as antagonists of the main phytopathogenic microorganisms, with a focus on their potential sustainable utilization for developing eco-friendly phytosanitary control strategies, both regionally and globally.
Key words: Bioactive components, Phytopathogenic microorganisms, Plant extracts.

Resumen

El desierto Chihuahuense (DC) posee una amplia variedad de especies vegetales como la gobernadora (*Larrea tridentata*), hojasén (*Flourensia cernua*) o Agave lechuguilla (*Agave lechuguilla*) que se han adaptado a las condiciones climáticas adversas que caracterizan a esta zona. Una de las claves para la supervivencia de estas plantas ha sido la síntesis de diferentes metabolitos secundarios como polifenoles, terpenos y flavonoides, los cuales protegen a la planta de factores abióticos y bióticos lo que ha permitido su adaptación al medio donde se desarrollan. Debido a sus propiedades biológicas, los metabolitos secundarios, también conocidos como compuestos bioactivos, han tenido diversas aplicaciones en diferentes áreas como la agrícola, en donde se ha establecido la actividad antimicrobiana de estas moléculas sobre diversos géneros de hongos y bacterias fitopatógenas. Este trabajo de revisión de literatura se llevó a cabo mediante búsqueda sistemática de información a través de la base de datos de Google Scholar, PubMed, SciELO, Scopus, utilizando palabras clave como microbiología, compuestos bioactivos, plantas del desierto Chihuahuense. El objetivo de este documento de revisión es describir el potencial que poseen los compuestos bioactivos presentes en las plantas del desierto Chihuahuense como antagonistas de los principales microorganismos fitopatógenos, con enfoque en el potencial aprovechamiento sustentable para el desarrollo de estrategias de control fitosanitario más sostenibles, tanto a nivel regional como global.

Palabras clave: Componentes bioactivos, extractos de plantas, microorganismos fitopatógenos.

Introducción

El desierto Chihuahuense (DC) se caracteriza por ser una región seca con una gran riqueza de flora y fauna, misma que se extiende por una amplia zona de Norteamérica, abarcando los estados de Durango, Nuevo León, Coahuila, Chihuahua, Zacatecas y San Luis Potosí en México, así como Nuevo México, Texas y Arizona en Estados Unidos de América (Granados-Sánchez et al., 2011). Dentro de la flora del DC destacan algunas especies como algunas pertenecientes al género agave (*Agave lechuguilla*, *Agave atrovirens*, *Agave salmiana*), hojasén (*Flourencia cernua*), nopal (*Opuntia sp*), palma del desierto (*Yucca carnerosana*), mezquite *(Prosopis spp.*), gobernadora *(Larrea tridentata*), orégano (*Lippia spp*), entre otras. Estas especies y algunas otras han sido empleadas desde tiempos remotos por las personas que habitan la región como fuente de alimento, bebidas alcohólicas y no alcohólicas, forraje, material de construcción de casas, medicina, fibras textiles, decoración, y diversas aplicaciones industriales (Palomo-Ligas et al., 2022).

Por otra parte, el clima de esta región es árido y con escasa precipitación pluvial, además de altas temperaturas, lo que genera condiciones climáticas extremas para las especies vegetales de la región (Ochoa et al., 2023). Las condiciones climáticas extremas del DC aunadas a la presencia e interacción con la vida animal típica de la zona y la exposición a especies reactivas de oxígeno del medio ambiente, subproductos del metabolismo del oxígeno como radicales y moléculas inorgánicas altamente reactivas, propician que las plantas nativas del DC produzcan diversidad de metabolitos secundarios como flavonoides, fenoles, taninos, saponinas, terpenos, catequinas, antocianinas, entre otros, principalmente en la parte aérea (flores, hojas, tallos) así como algunas raíces, cuya función es proteger a la planta frente a dichas condiciones (Cándido del Toro et al., 2023; Torres-León et al., 2023).

El estudio y potencial aplicación de los compuestos bioactivos presentes en la flora del DC se ha investigado en áreas como la farmacéutica, médica, alimentaria y agronómica (Palomo-Ligas et al., 2022), siendo esta última de un interés creciente debido a la búsqueda de aditivos y productos orgánicos y naturales que se puedan aplicar tanto en el campo como en postcosecha y que no sean dañinos para el medio ambiente, ya que se ha determinado que estas moléculas poseen un efecto antimicrobiano lo que conlleva a que extractos obtenidos de diversas fuentes vegetales posean el potencial para su aplicación como biopesticida y/o antagonistas de fitopatógenos (Steglińska et al., 2022). El objetivo de este trabajo de revisión es conjuntar la información que se tiene hasta el momento sobre la aplicación de los compuestos bioactivos de plantas del DC en el control biológico de diferentes patógenos de cultivos de gran importancia para esta región.

Metodología

Para la elaboración del presente documento, se realizó una búsqueda sistemática de información siguiendo una ruta metodológica rigurosa que garantizara la relevancia de las fuentes consultadas. La recolección de información se realizó a través de la base de datos de Google Scholar, PubMed, SciELO, Scopus, las cuales fueron seleccionadas por su alto impacto en el área de microbiología, compuestos bioactivos y biotecnología. Se utilizaron términos de búsqueda como componentes bioactivos, extractos de plantas, microorganismos fitopatógenos, plantas de desierto Chihuahuense. Por otra parte, el periodo de búsqueda se enfocó en el análisis artículos publicados entre los años 2000-2025, priorizando aquellos publicados durante los últimos 5 años. Se incluyeron artículos originales y revisiones de literatura. Finalmente, el total de artículos analizados quedó conformada por 109 artículos.

Principales microorganismos fitopatógenos

Uno de los grandes problemas en la agricultura mundial, responsables de pérdidas de entre 20 y 40 % de los alimentos producidos durante el cultivo, transporte y almacenamiento, además de afectar la calidad del producto, son las enfermedades causadas por diferentes microorganismos fitopatógenos (Bolívar-Anillo et al., 2020; Hernández-Montiel et al., 2021). La incidencia de estas enfermedades varía según el cultivo; por ejemplo, en maíz, arroz y papa se han reportado pérdidas de entre 17 y 40 %, mientras que en frutas las pérdidas en postcosecha superan el 50% (Saldaña-Mendoza et al., 2023). Asimismo, el impacto de fitopatógenos en los cultivos varía alrededor del 83% de las enfermedades son causadas por hongos, 9% por virus y fitoplasmas y 7% por bacterias (Khakimov et al., 2022). En la siguiente sección se describen algunas de las principales especies

de hongos y bacterias fitopatógenas de importancia agrícola y sus mecanismos de acción.

Hongos fitopatógenos

Dentro de los principales hongos fitopatógenos se tienen a diferentes especies de los géneros *Fusarium* y *Alternaria*, además de las especies como *Blumeria graminis, Botrytis cinérea, Colletotrichum spp., Mycosphaerella graminícola, Ustilago maydis*, los cuales causan diferentes enfermedades a través de diversos mecanismos complejos entre planta/cultivo y patógeno (Pacios-Michelena et al., 2021). En términos generales, los mecanismos inician con la invasión del hongo a la planta, misma que se da en 4 etapas: adhesión a la superficie del hospedador, invasión, colonización y expansión dentro del huésped (Li et al., 2022). Una vez que el patógeno se instala en la planta se da inicio a la producción de diversas toxinas que generan daño a las plantas, estas moléculas generalmente atacan a la membrana celular, mitocondria y cloroplastos, interfiriendo de esta manera con su metabolismo. Otro mecanismo de acción es a través de la promoción de desórdenes fisiológicos, muerte celular y posterior muerte de la planta mediante la inhibición de síntesis de proteínas y ácidos nucleicos, derivando en diferentes síntomas como marchitez, pudrición de los diferentes tejidos como tallo, raíz, hojas y frutos (Li et al., 2022; Peng et al., 2021).

Recientemente se han estudiado mecanismos de acción de los hongos fitopatógenos a través de la generación de especies reactivas de oxígeno, moléculas implicadas en el estrés oxidativo de los organismos. Este mecanismo se basa en la liberación y acumulación de una amplia cantidad de especies reactivas de oxígeno del hongo fitopatógeno los cuales se acumulan en las puntas de las hifas o alrededor de la pared celular penetrada durante el proceso infeccioso, favoreciendo el proceso de infección y proliferación del hongo sobre la planta (Zhang et al., 2020). Sin embargo, cada género fúngico presenta diversos mecanismos de acción, los cuales han evolucionado y se han adaptado a diversos cultivos, generando a su vez diversas maneras de invadir los tejidos vegetales y proliferar. Estos mecanismos de infección representan blancos fisiológicos clave para la acción de compuestos bioactivos de origen vegetal, particularmente aquellos capaces de alterar la integridad de las membranas, la actividad enzimática y el equilibrio redox del patógeno.

Fusarium oxysporum

Entre los numerosos microorganismos fúngicos que afectan a los cultivos destinados a la alimentación humana o animal, *Fusarium spp*. se encuentra en la mayoría de los entornos y es el patógeno fúngico de plantas más frecuentemente aislado. Este hongo puede infectar a las plantas a través de las raíces y bloquear el transporte de agua y nutrientes. Los síntomas incluyen el amarillamiento, marchitamiento y secado de las hojas, así como la decoloración del sistema vascular: El hongo puede sobrevivir en el suelo por varios años y se favorece por condiciones de temperatura cálida, humedad alta y suelo ácido (Vásquez Ramírez y Castaño Zapata, 2017).

Este hongo es un patógeno transmitido por el suelo, tiene la capacidad de infectar un gran número de cultivos destacando el tomate, pimientos, chile, plátano, calabaza entre otros. Este hongo fitopatógeno ha sido ampliamente caracterizado a nivel molecular revelando la presencia de diversas enzimas como proteasas y xilanasas que tienen la capacidad de degradar la pared celular de las plantas permitiendo de esta manera la entrada del patógeno (Neg et al., 2022). Existen a su vez subespecies de este hongo que se han

clasificado de acuerdo al cultivo al que atacan. Por ejemplo, el hongo específico para el tomate se denomina *Fusarium oxysporum f. sp. radicis-lycopersici*, mismo que causa síntomas de podredumbre a la corona y raíz de la planta a través de la invasión que va desde la zona de la raíz y se desplaza a través del xilema, donde bloquea los vasos después de producir enzimas y toxinas, provocando amarillamiento, marchitamiento y muerte de la planta, el tejido vascular del tallo se vuelve marrón en las plantas infectadas (Li et al., 2023). Por otro lado, la subespecie *Fusarium oxysporum f. sp. cubense*, agente etiológico de la marchitez en banano, una enfermedad destructiva para este cultivo y la cual a su vez se divide en 4 razas fisiológicas de acuerdo a la susceptibilidad del cultivo. Una de estas razas (raza tropical 4) reportada como la mas destructiva comienza su infección con la propagación de las hifas fúngicas por la raíz para posteriormente colonizar los vasos xilemáticos de la raíz, extendiéndose hacia el rizoma y el pseudotallo y se prolifera en el tejido vascular lo que provoca la interrupción de la translocación de agua, causando los síntomas de marchitez como clorosis del follaje, división longitudinal del pseudotallo, necrosis y muerte final de las plantas (Chen et al., 2024). Una vez que la planta muere, las esporas asexuales se forman en el tejido del huésped liberándose al suelo, donde esperan la oportunidad para infectar a otra planta y empezar el ciclo nuevamente (Vidha et al., 2024).

Alternaria spp.

Las especies del género *Alternaria* spp. causan enfermedades importantes en cultivos hortícolas y frutas como cereales, algodón, zanahorias, tomates, papas, manzanas, uvas, algunas semillas, cítricos, pepinos, pimientos, entre otros (Lee etal., 2015). De este género de microorganismos fitopatógenos destacan *A. solani* y *A. alternata*, especies patógenas causantes del tizón temprano en tomate y la mancha marrón en papa, respectivamente (Schmey et al., 2024). En términos generales, la patogénesis de *Alternaria* spp. Las enfermedades causadas por *Alternaria* spp. se caracterizan por lesiones necróticas asociadas a la producción de toxinas fúngicas. Estas toxinas, tanto selectivas como no selectivas del huésped, alteran procesos metabólicos y la integridad celular de los tejidos vegetales. La inhibición de estos mecanismos mediante compuestos fenólicos y flavonoides de origen vegetal ha sido reportada como una estrategia prometedora para el control de *Alternaria* spp. (Wang et al., 2022; Fernandes et al., 2023).

Botrytis spp.

Botrytis spp. pertenece al género *Botryotinia*. A este género pertenecen los hongos ascomicetes que afectan de forma primaria a las flores, los frutos, las hojas y los bulbos de una especie. Dentro de las principales especies de este género se encuentra *Botrytis cinérea*, un hongo fitopatógeno necrotrófico responsable del moho gris, una de las fitopatologías con mayor impacto en la horticultura y la fruticultura. Su patogenicidad se basa en la secreción de enzimas hidrolíticas y factores de virulencia que inducen la muerte celular del huésped, facilitando la colonización del tejido vegetal. Estos mecanismos convierten a *B. cinerea* en un objetivo adecuado para compuestos bioactivos con capacidad de alterar membranas celulares y procesos oxidativos. Estos son capaces de sobrevivir en entornos hostiles, son organismos que generan apotecios con un alto potencial de producción de esporas (Holz et al., 2007).

Existen diferentes especies como *B. cinerea, B. pseudocinerea, B. fabae, B. pelargoniae, B. calthae, B. sinoviticola* y *B. californica*, que infectan principalmente plantas dicotiledóneas y en menor grado a plantas eudicotiledóneas y monocotiledóneas (Hyde

et al., 2014). *Botrytis cinerea* es la principal especie causante del "moho gris" o "podredumbre gris", es un patógeno necrotrófico que ataca a más de 200 especies vegetales, en especial se puede observar en cultivos hortícolas (fresas y uvas), y está catalogada como una de las fitopatologías de mayor impacto a nivel nacional e internacional (Boiteux et al., 2015). *B. cinerea* causa miles de millones de dólares anuales en daños a los cultivos, tanto antes como después de la cosecha, en diversos cultivos, desde ornamentales hasta hortalizas y frutas (Veloso y van Kan, 2018). Es un microorganismo altamente versátil que tiene la capacidad de obtener nutrientes de material vegetal muerto o senescente, pero también puede infectar tejidos vivos. Posee un amplio rango de hospedadores y es capaz de afectar cualquier tipo de órgano o tejido vegetal en todas las etapas de su desarrollo.

B. cinerea prefiere humedad alta y temperaturas moderadas (crecimiento nulo o deficiente por encima de 30 °C), su presencia en el campo se limita a las zonas de clima templado. Sin embargo, como patógeno postcosecha en frutas, hortalizas y flores almacenadas en frío, representa una amenaza mundial (Fillinger y Walker, 2016). Tras el contacto inicial con el hospedador, se han descrito dos fases distintas: una fase temprana, caracterizada por la formación de focos de infección local sin propagación, y una fase tardía, caracterizada por la producción de abundante biomasa fúngica y la propagación de las lesiones. La invasión de plantas hospedantes por *B. cinerea* puede empezar desde tejidos dañados o aberturas naturales, lo que permite que el hongo fije la infección, el micelio puede crecer penetrando en el carpelo e invadiendo los ovarios aún no desarrollados. Tras la infección inicial, *B. cinerea* entra en una fase necrotrófica agresiva, que se propone que sea desencadenada por cambios bioquímicos tales como un aumento en compuestos orgánicos volátiles, azúcar y contenidos de nitrógeno en los tejidos del huésped en maduración. Durante esta etapa, el hongo secreta factores de virulencia para alterar el metabolismo del huésped, el sistema inmunológico y la estructura celular. Los efectos se caracterizan por la descomposición de la fruta, resultando en el ablandamiento de la pulpa y una piel marrón. *B. cinerea* en sí experimenta un rápido crecimiento de micelios en las superficies de las plantas y forma masas masivas de conidios grises. Al mismo tiempo, el tejido vegetal adyacente puede infectarse, permitiendo la propagación del moho gris en toda la planta y a las plantas cercanas (Neri et al., 2015; Cheung et al., 2020).

Penicillium spp.

El género *Penicillium* spp., compuesto por más de 200 especies, es uno de los grupos de hongos más grandes abarcando especies endofíticas benéficas y especies consideradas como fuente importante de antibióticos (Nicoletti y Trincone, 2016; Toghueo y Boyom, 2020). Aunque el género *Penicillium* incluye especies con aplicaciones biotecnológicas, algunas especies como *P. digitatum* y *P. italicum* son importantes patógenos postcosecha, responsables de la podredumbre verde y azul en cítricos. Estos hongos infectan a través de heridas mecánicas y producen enzimas que degradan la pared celular del fruto, provocando su deterioro (Chen et al., 2019; Lin et al., 2019; Zhu et al., 2019). La susceptibilidad de estos patógenos a compuestos fenólicos y aceites esenciales vegetales ha sido ampliamente documentada, lo que respalda su control mediante extractos de plantas.

Estos patógenos son patógenos específicos de heridas que pueden infectar la fruta en la plantación, en la empacadora o durante la manipulación y el almacenamiento posterior. La fruta infectada presenta micelios blancos y

conidios verdosos, el micelio produce enzimas que descomponen las paredes celulares de la fruta e inician la contracción, lo que resulta en una forma momificada hundida, causando una mancha acuosa y blanda, y el fruto se pudre (Talibi et al., 2014).

Dentro de este género también se puede encontrar a *P. digitatum*, el cual produce alcaloides termogénicos, como la triptoquialanina A y la triptoquialanina C, que son micotoxinas dañinas con un riesgo potencial para la salud pública (Papoutsis et al., 2019; Costa et al., 2021). Así mismo el hongo *P. italicum* es un patógeno de tipo anidante que se propaga rápidamente en contenedores empacados para infectar frutas adyacentes, incluso a bajas temperaturas en almacenamiento en frío (Iqbal et al., 2017).

Bacterias fitopatógenas

De las 7100 especies bacterianas que se encuentran clasificadas, aproximadamente 150 causan pérdidas de diferentes cultivos a nivel mundial. Entre los síntomas que provocan se incluyen manchas, plagas, cancros y pudriciones de los tejidos (Costa Almeida et al., 2023). Los géneros bacterianos fitopatógenos que más se asocian a enfermedades de cultivos son *Pseudomonas, Acidovorax*, *Streptomyces*, *Phytoplasma, Xylella*, *Spiroplasma*, *Clavibacter*, *Burkholderia*, *Xanthomonas*, *Erwinia*, *Pectobacterium*, *Pantoea*, *Agrobacterium, y Ralstonia* (Kannan et al., 2015).

En general las bacterias tienen una gran capacidad para desarrollar resistencia. Las estrategias que siguen estos microorganismos incluyen: uso de bombas de eflujo para desintoxicar la célula bacteriana, esporulación por bacterias Grampositivas, el uso de proteínas efectoras para alterar la fisiología de la planta huésped y suprimir sus mecanismos de defensa, desarrollo de biopelículas y la formación de células persistentes (Martins et al., 2018), resultando con ello la difícil tarea de erradicarlos de una manera adecuada.

Erwinia amylovora

Es una especie bacteriana causante del “fuego bacteriano”, enfermedad de importancia global y que infecta cultivos como manzana y pera. La entrada a la planta de este patógeno es a través de las flores y hojas, guiada generalmente por insectos vectores como moscas atraídas por el exudado, emulsión viscosa que contiene los agentes patógenos y sus factores de patogenicidad (Kharadi et al., 2021). Las siguientes etapas de invasión son infección de hojas en las puntas de los brotes, colonización del xilema e infección sistémica (Peng et al., 2021). Dentro de los factores de patogenicidad se encuentran los biofilms, exopolisacáridos compuestos principalmente por celulosa y glucosa, mismos que causan el bloqueo del transporte de agua y otros compuestos en el xilema de la planta, ocasionando marchitamiento y necrosis, síntomas más característicos de esta enfermedad (Kharadi y Sundin, 2021).

Clavibacter michiganensis

El tomate es uno de los cultivos que se ven afectados por diferentes bacterias fitopatógenas. Dentro de este grupo de patógenos se encuentra *Clavibacter michiganensis*, agente causal del cáncer bacteriano en esta planta. Al igual que *E. amylovora*, *C. michiganensis* coloniza sistemáticamente el xilema ocasionando marchitez, necrosis en las hojas, cancros en el tallo y posteriormente la muerte de la planta (Peritore-Galve et al., 2021). Esta invasión se lleva a cabo en el protoxilema en donde la bacteria se multiplica y produce exopolisacáridos y glicoproteínas que forman las biopelículas, disminuyendo de esta manera el flujo de agua, lo que ocasiona la

aparición de los diferentes síntomas característicos (Carezzano et al., 2023).

Alternativa de control biológico de fitopatógenos

En la actualidad existe una creciente tendencia en el uso de productos de origen natural, principalmente aquellos provenientes de diversas especies vegetales ricas en compuestos bioactivos, que han mostrado efectos positivos en diferentes áreas como la farmacéutica, alimentaria y la agrícola. En este último ámbito, dichos compuestos han demostrado actividad antimicrobiana, lo que ha impulsado en la formulación de biopesticidas como alternativas más sostenibles frente a los fungicidas sintéticos, los cuales se han asociado con efectos adversos para la salud humana y el medio ambiente (Palmieri et al., 2022). Adicionalmente, los microorganismos fitopatógenos han desarrollado la habilidad de adaptarse al modo de acción de los fungicidas lo que ha resultado en una disminución progresiva de su eficacia y en la necesidad constante de reformular estos productos para mantener su uso comercial (Gillmeister et al., 2019).

Extractos vegetales

En términos generales, un extracto vegetal se define como el producto obtenido a partir de material vegetal mediante el uso de un disolvente y un proceso de extracción específico. Estos extractos se caracterizan por su contenido de compuestos bioactivos, los cuales son responsables de sus actividades antimicrobianas (Godlewska et al., 2021). El grado de efectividad antimicrobiana de un extracto vegetal es dependiente de diversos factores como el tipo de planta y de esta la parte que se considera para la obtención de dicho extracto (hoja, tallo, raíz, flor), de la época en la que se obtiene o del tipo de método de extracción que se emplea. Los métodos de extracción pueden clasificarse en tradicionales y no convencionales, estos últimos también conocidos como métodos verdes o técnicas limpias, entre los que destacan las metodologías emergentes basadas en ultrasonido, microondas o la combinación de ambas (Choudhury et al., 2018; Abubakar y Haque, 2020; Vernès et al., 2020). Dichos métodos son considerados sostenibles ya que permiten el uso de disolventes orgánicos como el etanol, agua entre otros, y además se requiere menos tiempo para la extracción y reducen el uso de energía, traduciéndose en un impacto benéfico para el medio ambiente (Rodríguez García y Raghavan, 2021). Estas características son congruentes con las nuevas estrategias de la agricultura moderna en donde se investigan alternativas ecológicas para optimizar el control biológico de plagas.

Múltiples investigaciones se han centrado en evaluar la eficacia de los compuestos bioactivos tales como fenoles, flavonoides, capsaicinoides, carotenoides, vitaminas, terpenoides y saponinas los cuales participan en la supresión del crecimiento fúngico mediante la alteración del metabolismo celular. Estos compuestos, presentes en diferentes extractos vegetales, han sido probados frente a diversos microorganismos fitopatógenos, mostrando resultados positivos (Esposito et al., 2019; Mahmood et al., 2023).

Compuestos bioactivos de las plantas del Desierto Chihuahuense

En términos generales, los compuestos bioactivos son componentes químicos no nutritivos de las plantas, los cuales pueden clasificarse en dos grandes grupos: componentes primarios, esenciales para la supervivencia vegetal, como proteínas, carbohidratos y clorofila; y componentes secundarios o no esenciales, también denominados metabolitos secundarios, entre los que se incluyen polifenoles, terpenos y

moléculas nitrogenadas y/o aceites esenciales los cuales se asocian principalmente a la protección de la planta (López-Romero et al., 2023). Al igual que otras especies vegetales, las plantas del DC producen una amplia diversidad de metabolitos secundarios, los cuales han sido descritos en las últimas décadas (Tabla 1).

Tabla 1. Plantas del desierto Chihuahuense y algunos de los compuestos bioactivos que poseen.

Nombre común	Nombre científico	Compuestos bioactivos	Referencia
Gobernadora	*Larrea tridentata*	Saponinas, sapogeninas, taninos, esteroles, monoterpenos, sesquiterpenos, flavonoides glicosidados, gran cantidad de aceites esenciales y 67 compuestos no volátiles	Herrera-Medina et al., 2021
		Ácido elágico, ácido gálico, catequinas, kaempferol, quercetina, ácido nordhydroguaiaretico, timol, carvacol.	Morales-Ubaldo et al., 2022
Orégano mexicano	*Lippia graveolens* Kunth	Posee diversos compuestos bioactivos en el aceite esencial como carvacrol, timol, B cariophyleno y p-cymene, así como terpenos, además en sus extractos contienen quercetina, o-hexosido, pinocembrina y galangina y flavonoides	Bautista-Hernández et al., 2021
Candelilla	*Euphorbia antisyphilitica Zucc*	Contiene diversos compuestos fenólicos como ácido elágico, taninos hidrolizables, taninos condensados, ácido gálico y catequinas	Rojas et al., 2021
Agave lechuguilla	*Agave lechuguilla*	Contiene clorogenina, diosgenina, diglucósido de diosgenina, esmilagenina, hecogenina, manogenina, tigogenina hexosa, yucagenina y flavonoles, tales como quercetina	Esquivel-Gutiérrez et al., 2021
Nopal (tuna)	*Opuntia spp*	Su cáscara es rica en compuestos fenólicos, betaleínas y flavonoides	Ramírez-Rodríguez et al., 2019
Sangre de drago	*Jatropha dioica*	Jatropholona B, R-sisterol, citlalitriona, riolosatriona, triterpenos, quercetina, catequinas, taninos, ácido elágico y ácido gálico.	Ramírez-Moreno et al., 2020
Hojasen	*Flourensia cernua*	Terpenos y compuestos fenólicos	Estell et al., 2016
		Apigenina, vicenina, ácido cafeíco, luteolina, floretina	Aranda-Ledesma et al., 2022

Diversos estudios han evaluado la aplicación de estos compuestos bioactivos en distintos contextos, incluyendo la producción de hidrógeno y butanol, así como el desarrollo de herbicidas potenciales a partir del jugo de guiche de *Agave lechuguilla* (Oliva-Rodríguez et al., 2023; Sánchez Robles et al., 2023). Asimismo, se ha documentado su uso en la formulación de cubiertas comestibles para la conservación de frutos, como la manzana, empleando cera de candelilla (*Euphorbia antisyphilitica* Zucc) y extractos fermentados de hojasén (*Flourensia cernua*) (De León-Zapata et al., 2015), además de su aplicación como fuentes de fibras dietéticas (Cruz-Requena et al., 2016) y en el control de microorganismos patógenos humanos (Méndez et al., 2012).

Un grupo de compuestos bioactivos que ha mostrados relevancia son los aceites esenciales, mismos que constituyen un grupo de moléculas ampliamente estudiadas por su actividad antimicrobiana y su potencial en estrategias de biocontrol. Se trata de mezclas complejas de compuestos volátiles, responsables del aroma y sabor de las plantas, compuestas principalmente por terpenos, compuestos fenólicos y fenilpropanoides (Sil et al., 2020). Diversos polifenoles y monoterpenos, como carvacrol, timol, p-cimeno, γ-terpineno y cinamaldehído, así como el fenilpropanoide eugenol, presentes en aceites esenciales, han mostrado actividad antimicrobiana. Esta actividad se atribuye principalmente a la sinergia entre los compuestos volátiles que los conforman y no a la acción de un solo componente aislado (Christaki et al., 2012; Košćak et al., 2023).

Como se ha mencionado previamente, las plantas nativas del DC han sido utilizadas históricamente por los habitantes de la región con diversos fines medicinales. Entre estas especies se encuentran el orégano (*Lippia graveolens*), el hojasén (*Flourensia cernua*), el ajo (*Allium sativum* L.) y la gobernadora (*Larrea tridentata*), las cuales forman parte del conjunto de plantas empleadas tradicionalmente con este propósito.

De manera particular, el orégano se utiliza para la obtención de aceites esenciales ricos en fitoquímicos, entre los que destacan terpenos como carvacrol, timol, β-cariofileno y p-cimeno, así como flavonoides tales como O-hexósido y pinocembrina, los cuales han sido descritos para *Lippia graveolens* Kunth (Bautista-Hernández et al., 2021). Otra planta ampliamente utilizada en la región es el hojasén (*Flourensia cernua*), de la cual se ha reportado una importante cantidad de aceites esenciales, entre los cuales se encuentran α-pineno, sabineno, 3-careno, p-cimeno, limoneno, canfor, bomeol, cis-jasmonato, β-cariofileno, α-humuleno, ledeno, flourensadiol, entre otros (Estell et al., 1998). Por otra parte, en la planta comúnmente conocida como damiana (*Turnera diffusa* Willd.) se han identificado en las hojas diversos compuestos bioactivos, incluyendo 1,8-cineol, α- y β-pineno, p-cimeno, timol, calameno, α-copaeno, taninos, flavonoides, damianina, β-sitosterol, arbutina, glucósidos, gonzalitosina y tetrafilina B. Asimismo, en el poleo, otra planta aromática de interés, se han reportado compuestos como monoterpenos, óxido de piperitenona y limoneno (Martínez-Ávila et al., 2021). Con lo anterior, queda establecido que las plantas del DC son una fuente importante de una amplia diversidad de compuestos bioactivos con una potencial aplicación como agentes antimicrobianos.

Actividad antimicrobiana y mecanismos de acción de los compuestos bioactivos DC

El control de enfermedades que afectan a diversos cultivos ha evolucionado hacia enfoques cada vez más sustentables, recurriendo a alternativas como el uso de microorganismos antagonistas y extractos vegetales que han demostrado eficacia en este contexto (Greff et al., 2023). Los compuestos bioactivos que se encuentran en algunas plantas poseen propiedades antimicrobianas y han sido utilizados tradicionalmente como plaguicidas de origen natural, caracterizados por su biodegradabilidad en periodos cortos, lo que los convierte en opciones ambientalmente más compatibles (Ullah y Wiedmer et al., 2025).

En este sentido, la actividad antimicrobiana de una amplia variedad de extractos vegetales ha sido probada frente a distintos microorganismos fitopatógenos. Por ejemplo, extractos obtenidos a partir de frutos frescos de chile de variedades como habanero (*Capsicum chinense*), serrano (*Capsicum annuum var. Serrano*), jalapeño (*Capsicum annuum var. Jalapeño*) y pimiento morrón (*Capsicum annuum var. annuum*) han sido

evaluados contra hongos fitopatógenos como *Fusarium andiyazi* y *Cochliobolus* spp. (López-Muñoz et al., 2019). Asimismo, diversas fuentes vegetales, entre ellas hojas de moringa (*Moringa oleifera*), aguacate (*Persea americana*), cola de caballo (*Equisetum hymale*), gobernadora (*Larrea tridentata*), gordolobo (*Gnaphalium semiamplexicaule*), boldo (*Peumus boldus*), prodigiosa (*Brickellia squarrosa*), romero (*Rosmarinus officinalis*) y raíces de costomate (*Physalis coztomatl*), han mostrado efectos inhibitorios sobre el crecimiento de *Fusarium oxysporum*, *Fusarium solani* y *Rhizoctonia solani* (Rodríguez-Castro et al., 2020).

En particular, los compuestos bioactivos derivados de plantas del DC y presentes en diferentes tipos de extractos vegetales, han sido estudiados como agentes antagonistas frente a diversas enfermedades de cultivos de importancia agrícola. Así mismo, se ha demostrado en diferentes trabajos de investigación que estás moléculas poseen una buena capacidad antimicrobiana y con efecto frente a algunos de los principales microorganismos fitopatógenos. En este contexto, se han documentado múltiples estudios que evidencian el potencial de estas especies como alternativas para el control biológico, cuyos resultados se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Efecto antimicrobiano de diferentes extractos de plantas del desierto Chihuahuense sobre algunos microorganismos fitopatógenos.

Especie vegetal	Tipo de muestra	Solvente utilizado	Microorganismo fitopatógeno	Resultado	Referencia
Flourensia cernua	Hojas y tallos	Etanol	*Alternaria solani*, *Monilinia fructigena*, *Botrytis cinerea* y *Venturia inaequalis*	Inhibición del crecimiento de los hongos fitopatógenos a excepción de *Alternaria solani*.	Ganchev, 2022
	Hojas	Agua	*Colletotrichum gloeosporioides*, *Fusarium oxysporum*, *Botrytis cinerea*, *Penicillium* sp., *Rhizopus stolonifer*, *Sclerotinia sclerotiorum* y *Mucor* sp.	Inhibición del crecimiento en un 50% de tres hongos fitopatógenos durante la etapa de postcosecha en el cultivo de tomate.	Álvarez-Pérez et al., 2020
Agave lechuguilla *Carya illinoinensis*, *Jatropha dioica*, *Larrea tridentata* y *Lippia graveolens*	Hojas, raíces, tallos, cáscara	Agua y etanol	*Fusarium oxysporum*	Los extractos etanólicos presentaron mayor actividad antifúngica comparados con los acuosos, siendo *A. lechuguilla*, *C. illinoinensis* y *L. graveolens* presentaron mayor inhibición en el crecimiento de los hongos fitopatógenos.	Tucuch-Pérez et al., 2020

Agave lechuguilla, Carya illinoinensis y Lippia graveolens	Hojas, tallo, ruezno	Etanol	*Fusarium oxysporum*	Se observó disminución de la incidencia y severidad de la enfermedad con extractos de *A. lechuguilla* hoja y *L. graveolens* tallo, además de un mayor desarrollo en parámetros morfométricos de las plantas.	Tucuch-Pérez et al., 2021
Larrea tridentata, Flourensia cernua, Opuntia ficus-indica, Agave lechuguilla y Yucca filifera	Hojas, tallos, raíces	Etanol	*Rhizoctonia solani*	Los extractos etanólicos fueron efectivos a bajas concentraciones en la inhibición micelial del hongo fitopatógeno.	Castillo-Reyes et al., 2015
Fouquieria splendens, Agave striata,	Parte aérea de las plantas	Metanol	*Clavibacter michiganensis subsp. michiganensis*	Los resultados *in vitro* indicaron que los extractos de *F. splendens* y *A. striata* presentan inhibición sobre el fitopatógeno. Por otro lado, el extracto de *F. splendens* mostró control a menores concentraciones que con *A. striata*.	Ramírez et al., 2023
Jatropha dioica	Raíces	Metanol, hexeno, acetato de etilo	*Clavibacter michiganensis* subsp. m*ichiganensis, Pseudomonas syringae* pv. *Tomato, Xanthomonas campestris* pv. *vesicatoria*	Los extractos presentaron actividad inhibitoria in vitro sobre el crecimiento de las bacterias fitopatógenas evaluadas.	Pérez-Pérez et al., 2020
Euphorbia antisyphilitica Zucc	Tallos	Etanol	*Erwinia amylovora, Clavibacter michiganensis, Xanthomonas axonopodis*	Los extractos de candelilla fueron efectivos contra las bacterias fitopatógenas.	Burboa et al., 2014

La actividad antimicrobiana de los compuestos bioactivos varía radicalmente según la estructura del fitopatógeno. Al ser moléculas de amplio espectro, su mecanismo de acción afecta diferentes puntos vulnerables dependiendo del tipo de microorganismo invasor. En hongos fitopatógenos, los compuestos bioactivos de las plantas pueden afectar a estos microorganismos a través de diferentes vías moleculares, actuando principalmente sobre biomembranas, proteínas y ácidos nucleicos. Su potencial

antimicrobiano radica en la capacidad para inhibir el crecimiento, el desarrollo y la supervivencia de los patógenos (Rodríguez-Guadarrama et al., 2018; Šovljanski et al., 2023).

En bacterias fitopatógenas, el mecanismo de acción de los compuestos bioactivos es complejo y suele depender de la acción combinada de diversas moléculas, más que de la interacción con un único blanco celular (da Silva et al., 2016). Entre los principales mecanismos descritos se incluyen la inhibición de la síntesis de proteínas (Niño et al., 2012), la alteración de la pared y la membrana celular (Khameneh et al., 2021) y la inhibición de la síntesis de ácidos nucleicos (Xie et al., 2015), entre otros procesos esenciales para la viabilidad bacteriana.

Debido a la diversidad y acción sinérgica de compuestos bioactivos como polifenoles, flavonoides, taninos, aceites esenciales, ácidos fenólicos, entre otros, las vías de actividad antimicrobiana en fitopatógenos son diversas, afectando estructuras de la pared o membrana celular, inactivación enzimática, daño en ácidos nucleicos, etc. Por ejemplo, los flavonoides tienen la capacidad de inducir cambios celulares a través de la interacción con ácidos nucleicos, proteínas, lípidos y/o carbohidratos. Dentro de estas bioactividades destacan las interacciones flavonoides-proteínas, como quinasas, α-glucosidasa, enoyl-ACP reductasa, entre otras. Sin embargo, actualmente no se ha definido de manera concluyente dichas interacciones (Joyner, 2021). Por otra parte, los flavonoides más hidrofílicos interactúan principalmente con la interfaz de la membrana, mientras que los flavonoides hidrofóbicos se insertan en el interior de la bicapa lipídica (Yuan et al., 2021). La lipofilicidad constituye una característica clave de diversas moléculas bioactivas y se relaciona directamente con su afinidad por ambientes lipídicos y su actividad antimicrobiana. Entre algunas de las plantas del DC que contienen flavonoides se encuentran la gobernadora (*Larrea tridentata)* (Morales-Márquez et al., 2025), el hojasén (*Flourensia cernua*) (Valero-Mendoza et al., 2025) y la candelilla (*Euphorbia antisyphilitica*) (Bautista-Hernández et al., 2021).

Otro grupo importante de compuestos bioactivos son los taninos, los cuales, desde el punto de vista químico, se dividen dos grandes grupos: los galotaninos y elagitaninos, caracterizados por un núcleo de glucosa o poliol esterificado con ácido gálico o ácido hexahidroxidifénico, respectivamente, y los taninos condensados, que corresponden a oligómeros o polímeros de flavan-3-oles, conocidos como proantocianidinas, debido a su descomposición al calentarse en etanol (Guo et al., 2020). Una de las características de estos compuestos es su poder antioxidante, mismo que lo hace un candidato idóneo como antimicrobiano. Entre los mecanismos antioxidantes de los taninos destaca su capacidad para asociarse con proteínas mediante puentes de hidrógeno e interacciones hidrofóbicas, provocando la precipitación irreversible de estas macromoléculas. Asimismo, los taninos pueden actuar como agentes quelantes e inhibidores enzimáticos, lo que conduce al daño de la pared celular de los microorganismos, particularmente en bacterias Gram positivas, cuya pared celular es estructuralmente más susceptible (Meza Ucella-Filho et al., 2022).

Los grupos funcionales presentes en los compuestos bioactivos desempeñan un papel determinante en su actividad antimicrobiana. En este sentido, los terpenoides, ampliamente distribuidos en la flora del DC, conforman el grupo más numeroso de fitoquímicos y presentan una elevada diversidad estructural, al estar formados por múltiples unidades de

cinco carbonos conocidas como unidades de isopreno (Adedokum et al., 2023). Estas moléculas tienen la capacidad de inhibir procesos esenciales en las bacterias, como la captación de oxígeno y la fosforilación oxidativa, lo que provoca alteraciones en la respiración celular y conduce al desacoplamiento de la fosforilación oxidativa en el microorganismo. Adicionalmente, los terpenoides comparten con los flavonoides una marcada naturaleza lipofílica, lo que potencia su acción antimicrobiana (Mahizan et al., 2019).

La actividad antimicrobiana de los compuestos polifenólicos está relacionado a la inactivación de las enzimas en el microorganismo, lo cual causa cambios en la permeabilidad de la membrana. Así mismo, se ha observado que estos compuestos pueden inducir la ruptura de las membranas y causa la lisis de las conidias e hifas, generando la pérdida de la integridad celular y, eventualmente, la muerte del hongo (Álvarez-Pérez et al., 2020). Dentro del grupo de compuestos fenólicos se encuentran los ácidos fenólicos, moléculas que tienen un anillo aromático unido a un grupo hidroxilo (hidroxilo fenólico) y a un grupo carboxilo. Estos compuestos comúnmente se encuentran conjugados a ésteres, éteres, azúcares simples, polímeros vegetales, ácidos orgánicos o polifenoles. Su mecanismo de acción antimicrobiana se asocia principalmente con el daño a la membrana celular, lo que provoca modificaciones en la hidrofobicidad y en la carga superficial de la célula bacteriana, ocasionando la liberación del contenido citoplasmático (Kauffmann y Castro, 2023).

Finalmente, el modo de acción antimicrobiana de los aceites esenciales sobre los microorganismos fitopatógenos es amplio y multifactorial. De manera general, el mecanismo de acción de los aceites esenciales se debe a sus propiedades lipofílicas que le permiten atravesar la pared celular y dañar la membrana citoplasmática al tiempo que alteran varias capas de ácidos grasos, polisacáridos y fosfolípidos, aumentando a la vez la permeabilidad, ocasionando alteraciones de la pared celular la estabilidad citoplasmática y el impacto del daño celular y el escape de macromoléculas (Sil et al., 2020). Particularmente, en bacterias fitopatógenas se han descrito diversos mecanismos de inhibición, entre los que se incluyen la degradación de la pared celular, alteraciones en la actividad del ATP y de las ATPasas intra y extracelulares, así como la interferencia en los sistemas de detección de quórum, lo que conduce a una disminución de la actividad proteolítica, la formación de biopelículas y la expresión de factores de virulencia (Košćak et al., 2023). En el caso de los hongos fitopatógenos, la bioactividad de estos compuestos se ha relacionado con su carácter lipofílico, el cual favorece la ruptura de las paredes celulares y la pérdida de la integridad estructural del microorganismo (Pandey et al., 2017).

Como se detalló en las tablas 1 y 2, las plantas del DC poseen una gran diversidad de compuestos bioactivos con actividad antimicrobiana frente a fitopatógenos, lo que resalta su potencial como agentes de control en una época en donde se buscan alternativas para formulaciones con ingredientes naturales y sustentables, lo que conlleva a su alto valor agregado.

Bioprocesos y biocontrol

Una alternativa relevante para el desarrollo de biopesticidas es el uso de herramientas biotecnológicas, las cuales permiten reducir la incidencia de enfermedades en cultivos mediante el empleo de microorganismos productores de metabolitos antimicrobianos o antagonistas de fitopatógenos. Estos microorganismos presentan características como estabilidad genética, eficacia a bajas

concentraciones, requerimientos nutricionales simples y capacidad para producir diversos compuestos bioactivos (Hernández-Montiel et al., 2021; Mitrović et al., 2021). Dentro de este grupo de microorganismos, también llamados agentes de control biológico, se encuentran géneros como *Bacillus, Pseudomonas, Lactobacillus, Streptomyces, Saccharomyces* y *Trichoderma* que han sido probados en el tratamiento contra la podredumbre negra causada por *Xanthomonas campestris pv. campestris* (Grahovac et al., 2021) o el mismo *Bacillus* sp. que es capaz de inhibir el crecimiento de *Aspergillus flavus* (Vlajkov et al., 2022).

Las plantas del DC han sido usadas como sustrato por algunos agentes de control biológico para la producción de diversos metabolitos y/o extractos que inhiben el crecimiento de microorganismos fitopatógenos. Coronado-Contreras y colaboradores (Coronado-Contreras et al., 2023) utilizaron extractos fermentados por diferentes cepas de *Aspergillus niger* y *Aspergillus oryzae* de residuos de cáscara de tuna, fruta del nopal (*Opuntia ficus-indica*), probándolos contra los fitopatógenos *Alternaria* sp. y *Botrytis* spp. y obteniendo inhibición en su crecimiento debido a la presencia de taninos condensados e hidrolizables los cuales aumentan su biodisponibilidad tras el proceso de fermentación. Por su parte, De León y colaboradores (De León et al., 2013) evaluaron la biotransformación de extractos acuosos de hojasén (*Flourensia cernua*) mediante el hongo *Aspergillus niger*, observando inhibición del crecimiento de *Penicillium expansum* y *Fusarium oxysporum*.

Conclusiones

El desierto Chihuahuense es una región de alta riqueza florística, cuyas especies vegetales presentan una amplia diversidad de compuestos bioactivos con actividad antimicrobiana. Estas características posicionan a la flora del DC como una fuente promisoria para el desarrollo de formulaciones de biopesticidas y como sustrato potencial para la obtención de agentes de control biológico. Asimismo, la combinación de las propiedades bioactivas de estas plantas con herramientas biotecnológicas y metodologías emergentes para la obtención y optimización de extractos vegetales representa una alternativa viable para el manejo de enfermedades agrícolas. En este contexto, el aprovechamiento sustentable de la flora del desierto Chihuahuense ofrece perspectivas favorables para el desarrollo de estrategias de control fitosanitario más sostenibles, tanto a nivel regional como global, aunque se requiere profundizar en estudios de validación, estandarización y aplicación a escala productiva.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro y a la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Coahuila por proporcionar las instalaciones, equipos e insumos necesarios para llevar a cabo este proyecto. Así mismo, a la SECIHTI por su apoyo con la beca de estancia posdoctoral.

Referencias

Abubakar, A.R. y Haque, M. (2020). Preparation of Medicinal Plants: Basic Extraction and Fractionation Procedures for Experimental Purposes. *Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences*, *12*(1), 1-10. 10.4103/jpbs.JPBS_175_19

Adedokun, K.A., Imodoye, S., Bello, I.O. y Lanihun, A.A., (2023). Therapeutic potentials of medicinal plants and significance of computational tools in anti-cancer drug discovery, Editor(s): Chukwuebuka Egbuna, Mithun Rudrapal, Habibu Tijjani, En Drug

Discovery Update, Phytochemistry, Computational Tools and Databases in Drug Discovery (Pages 393-455). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90593-0.00017-4

Álvarez-Pérez, O.B., Ventura-Sobrevilla, J.M., Ascacio-Valdés, J.A., Rojas, R., Verma, D.K. y Aguilar, C.N. (2020). Valorization of *Flourensia cernua* DC as source of antioxidants and antifungal bioactives. *Industrial Crops and Products*, *152*, 112422. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112422

Aranda-Ledesma, N.E., González-Hernández, M.D., Rojas, R., Paz-González, A.D., Rivera, G., Luna-Sosa, B. y Martíenz-Ávila, G.C.G. (2022). Essential Oil and Polyphenolic Compounds of *Flourensia cernua* Leaves: Chemical Profiling and Functional Properties. *Agronomy*, *12*(10), 2274. https://doi.org/10.3390/agronomy12102274

Bautista-Hernández I., Aguilar, C.N., Martínez-Ávila, G.C.G., Torres-León, C., Ilina, A., Flores-Gallegos, A.C., Kumar Verma, D. y Chávez-González, M.L. (2021). Mexican oregano (*Lippia graveolens* Kunth) as source of bioactive compounds: A review. *Molecules*, *26*(17), 5156. https://doi.org/10.3390/molecules26175156

Bautista-Hernández, I., Aranda-Ledesma, N.E., Rojas, R., Tafolla-Arellano, J.C., Martínez-Ávila, G.C.G. (2021). Antioxidant activity of polyphenolic compounds obtained from *Euphorbia antisyphilitica* by-products. *Heliyon*, *7*(4), e06734. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06734

Boiteux, J.J., Vanda Hapon, M., Fernández, M.A., Lucero, Gabriela, S.L. Y Pizzuolo, P.H. (2015). Effect of aqueous extract of chanar (Geoffroea decorticans Burkart) on *Botrytis cinerea*, as possible alternative for control in post-harvest of table grape. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo*, *47*, 241-250.

Bolívar-Anillo, H.J., Garrido, C. y Collado, I.G. (2020). Endophytic microorganisms for biocontrol of the phytopathogenic fungus *Botrytis cinerea*. *Phytochemistry Reviews*, *19*, 721-740. 10.1007/s11101-019-09603-5

Burboa, E.A., Ascacio-Valdés, J.A., Zugasti-Cruz, A., Rodríguez-Herrera, R. y Aguilar, C.N. (2014). Capacidad antioxidante y antibacteriana de extractos de residuos de candelilla. *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*, *45*(1), 51-56.

Cándido del Toro, C.A., Arredondo-Valdés, R., Govea Salas, M., Anguiano Cabello, J.C., Segura-Ceniceros, E.P., Ramos-González, R., Ascacio-Valdés, J.A., Laredo-Alcalá, E.I. y Iliná, A. (2023). Plants of the Chihuahuan Semi-desert for the Control of Phytopathogens. En: Aromatic and Medicinal Plants of Drylands and Deserts. 10.1201/9781003251255-6

Carezzano, M. E., Paletti Rovey, M. F., Cappellari, L. d. R., Gallarato, L. A., Bogino, P., Oliva, M. d. l. M. y Giordano, W. (2023). Biofilm-Forming Ability of Phytopathogenic Bacteria: A Review of its Involvement in Plant Stress. *Plants*, *12*(11), 2207. https://doi.org/10.3390/plants12112207

Castillo-Reyes, F., Hernández-Castillo, F.D., Gallegos-Morales, G., Flores-Olivas, A., Rodríguez-Herrera, R. y Aguilar, C.N. (2015). Efectividad *in vitro* de *Bacillus* y

polifenoles de plantas nativas de México sobre *Rhizoctonia-Solani*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 6*(3), 549-562.

Chen, C., Cai, N., Chen, J., y Wan, C. (2019). Clove Essential Oil as an Alternative Approach to Control Postharvest Blue Mold Caused by *Penicillium italicum* in Citrus Fruit. *Biomolecules, 9*(5), 197. 10.3390/biom9050197

Chen, D., Ju, M., Xie, J. Chen X.L. y Peng, J. (2024). Current progress on pathogenicity-related genes in *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* tropical race 4. *Phytopathology Research 6*, 53. https://doi.org/10.1186/s42483-024-00274-5

Cheung, N., Tian, L., Liu, X. y Li, X. (2020). The Destructive Fungal Pathogen *Botrytis cinerea*-Insights from Genes Studied with Mutant Analysis. *Pathogens. 9*(11), 923. 10.3390/pathogens9110923

Choudhury, D., Dobhal, P., Srivastava, S., Saha, S. y Kundu, S. (2018). Role of botanical plant extracts to control plant pathogens-A review. *Indian Journal of Agricultural Research, 52*(4), 341-346. 10.18805/IJARe.A-5005

Christaki, E., Bonos, E., Giannenas, I. y Florou-Paneri, P. (2012). Aromatic Plants as a Source of Bioactive Compounds. *Agriculture, 2*(3), 228-243. https://doi.org/10.3390/agriculture2030228

Coronado-Contreras, S.A., Ruelas-Chacón, X., Reyes-Acosta, Y.K., Dávila-Medina, M.D., Ascacio-Valdés, J.A. y Sepúlveda, L. (2023). Valorization of prickly pear peel residues (*Opuntia ficus-indica*) using of solid-state fermentation to accumulation of tannins. *Preprints*. DOI: 10.20944/preprints202309.0895.v1

Costa Almeida, O.A., Oliveira de Araujo, N., Silva Dias, B.H., Sant´Anna Freitas, C., Fender Coerini, L., Ryu, C.M. y Castro Oliveira, J. (2023). The power of the smallest: The inhibitory activity of microbial volatile organic compounds against phytopathogens. *Frontiers in Microbiology, 13*, 951130. https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.951130

Costa, J.H., Bazioli, J.M., Barbosa, L.D., dos Santos Júnior, P.L.T., Reis, F.C.G., Klimeck, T., Crnkovic, C.M., Berlinck, R.G.S., Sussulini, A., Rodrigues, M.L. y Pacheco Fill, T. (2021). Phytotoxic tryptoquialanines produced in vivo by *Penicillium digitatum* are exported in extracellular vesicles. *Genetics and Molecular Biology, 12*(1), e03393-20. 10.1128/mBio.03393-20

Cruz-Requena, M., Aguilar-González, C.N., Prado Barragán, L.A., Correia, T., Contreras Esquivel, J.C. y Rodríguez-Herrera, R. (2016). Functional and physico-chemical properties of six desert-sources of dietary fiber. *Food Bioscience 16*, 26-31. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2016.08.001

da Silva, C.M.A., Costa, B.M.S., Silva, A.G., Souza, E.B., Silva, M.V., Correia, M.T.S., SantÂ´Anna, S.A.P., y de Menezes, L.V.L. (2016). Antimicrobial activity of several Brazilian medicinal plants against phytopathogenic bacteria. *African Journal of Microbiology Research, 10*(17), 578-583. https://doi.org/10.5897/AJMR2014.6999

De León, M.A., Sáenz, A., Jasso-Cantú, D., Rodríguez, R., Pandey, A. y Aguilar, C.N. (2013). Fermented *Flourensia cernua* Extracts and Their in vitro Assay Against *Penicillium expansum* and

Fusarium oxysporum. *Food Technology and Biotechnology, 51* (2), 233–239.

De León-Zapata, M.A., Saénz-Galindo, A., Rojas-Molina, R., Rodríguez-Herrera, R. y Aguilar, C.N. (2015). Edible candelilla wax coating with fermented extract of tarbush improves the shelf life and quality of apples. *Food Packaging and Shelf Life, 3*, 70-75. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2015.01.001

Esposito, T., Celano, R., Pane, C., Piccinelli, A.E., Sansone, F., Picerno, P., Zaccardelli, M., Aquino, R.P. y Mencherini, T. (2019). Chestnut (*Castanea sativa* Miller.) Burs Extracts and Functional Compounds: UHPLC-UV-HRMS Profiling, Antioxidant Activity, and Inhibitory Effects on Phytopathogenic Fungi. *Molecules, 24*, 302. https://doi.org/10.3390/molecules24020302

Esquivel-Gutiérrez, E.R., Manzo-Ávalos, S., Peña-Montes, D.J., Saavedra-Molina, A., Morreeuw, Z.P. y Reyes, A. (2021). Hypolipidemic and Antioxidant Effects of Guishe Extract from *Agave lechuguilla*, a Mexican Plant with Biotechnological Potential, on Streptozotocin-Induced Diabetic Male Rats. *Plants*, *10*(11), 2492. https://doi.org/10.3390/plants10112492

Estell, R.E., Fredrickson, E.L. y James, D.K. (2016). Effect of light intensity and wavelength on concentration of plant secondary metabolites in the leaves of *Flourensia cernua*. *Biochemical Systematics and Ecology, 65*, 108-114. https://doi.org/10.1016/j.bse.2016.02.019

Estell, R.E., Fredrickson, E.L., Anderson, D.M., Havstad, K.M., Remmenga, M.D. (1998). Relationship of tarbush leaf surface terpene profile with livestock herbivory. Journal of Chemical Ecology 24: 1-12. https://doi.org/10.1023/A:1022399426352

Fernandes, Ch., Casadevall, A. y Gonçalves, T. (2023). Mechanisms of *Alternaria* pathogenesis in animals and plants. *FEMS Microbiology Reviews*, *47*(6), 1-25. https://doi.org/10.1093/femsre/fuad061

Fillinger, S. y Walker, A.S. (2016) Chemical control and resistance management of *botrytis* diseases. En: Fillinger, S. & Elad, Y. (Eds.) *Botrytis – the fungus, the pathogen and its management in agricultural systems.* (pp. 189-216). Switzerland: Springer International Publishing.

Ganchev, D. (2022). Antisporulation action of tarbush plant (*Flourensia cernua*) towards conidiospores of plant pathogens. *Malasyan Journal of Sustainable Agriculture*, *6*(2), 74-77. 10.26480/mjsa.02.2022.81.84

Gillmeister, M., Ballert, S., Raschke, A., Geistlinger, J., Kabrodt, K., Baltruschat, H., Deising, H.B. y Schellenberg, I. (2019). Polyphenols from *Rheum* Roots Inhibit Growth of Fungal and Oomycete Phytopathogens and Induce Plant Disease Resistance. *Plant Disease*, *103*(7), 1674-1684. https://doi.org/10.1094/PDIS-07-18-1168-RE

Godlewska, K., Ronga, D. y Michalak, I. (2021). Plant extracts - importance in sustainable agriculture. *Italian Journal of Agronomy*, *16*(2), 1851. https://doi.org/10.4081/ija.2021.1851

Grahovac, J., Pajcin, I., Vlajkov, V., Roncevic, Z., Dodic, J., Cvetkovic, D. y Jokic, A. (2021). *Xanthomonas*

campestris biocontrol agent: selection, medium formulation and bioprocess kinetic analysis. *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly, 27*(2), 131-142. https://doi.org/10.2298/CICEQ200508032G

Granados-Sánchez, D., Sánchez-González A., Granados-Victorino, R.O. y Borja de la Rosa, A. (2011). Ecología de la vegetación del desierto Chihuahuense. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales. 17,* 111-130. https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.10.102

Greff, B., Sáho, A., Lakatos, E. y Varga, L. (2023). Biocontrol activity of aromatic and medicinal plants and their bioactive components against soil-borne pathogens. *Plants, 12*(4), 706. https://doi.org/10.3390/plants12040706

Guo, L., Qiang, T., Ma, Y., Wang, K. y Du, K., (2020). Optimization of tannin extraction from *Coriaria nepalensis* bark as a renewable resource for use in tanning. *Industrial Crops and Products, 149*, 112360. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112360

Hernández-Montiel, L.G., Droby, S., Preciado-Rangel, P., Rivas-García, T., González-Estrada, R.R., Gutiérrez-Martínez, P. y Ávila-Quezada, G.D. (2021). A sustainable alternative for postharvest disease management and phytopathogens biocontrol in fruit: Antagonistic yeasts. *Plants, 10*(12). 2641. https://doi.org/10.3390/plants10122641

Herrera-Medina, R.H., Álvarez-Fuentes, G., Contreras-Servín, C. y García-López, J.C. (2021). Creosote Bush (*Larrea tridentata*) Phytochemical Traits and its Different uses: A Review. *Journal of Applied Life Sciences International, 24*(2), 34-45. 10.9734/jalsi/2021/v24i230221

Holz, G., Coertze, S. y Williamson, B. (2007). The Ecology of Botrytis on Plant Surfaces. In: Elad, Y., Williamson, B., Tudzynski, P., Delen, N. (eds) Botrytis: Biology, Pathology and Control. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2626-3_2

Hyde, K.D., Nilsson, R.H., Alias, S.A., Ariyawansa, H.A., Blair, J.E., Cai, L., de Cock, A.W.A.M., Dissanayake, A.J., Glockling, S.L., Goonasekara, I.D., Gorczak, M., Hahn, M., Jayawardena, R.S., Van Kan, J.A.L., Laurence, M.H., Lévesque, C.A., Li, X., Liu, J.K., Maharachchikumura, S.S.N., Manamgoda, D.S., Martin, F.N., McKenzie, E.H.C., McTaggart, A.R., Mortimer, P.E., Nair, P.V.R., Pawlowska, J., Rintoul, T.L., Shivas, R.G., Spies, C.F.J., Summerell, B.A., Taylor, P.W.J., Terhem, R.B., Udayanga, D., Vaghefi, N., Walther, G., Wilk, M., Wrozosek., M., Xu, J.C., Yan, J., Zhou, N. (2014) One stop shop: backbones trees for important phytopathogenic genera: I (2014). *Fungal Diversity, 67* (1), 21-125. https://doi.org/10.1007/s13225-014-0298-1

Iqbal, Z., Iqbal, J., Abbas, I. y Kamran, M. (2017). Innovative strategies for eco-friendly management of citrus blue mold disease caused by *Penicillium italicum* Wehmer. *Agriculture and Food, 5*, 361-365.

Joyner, P. M. (2021). Protein Adducts and Protein Oxidation as Molecular Mechanisms of Flavonoid Bioactivity. *Molecules*, *26*(16), 5102.

https://doi.org/10.3390/molecules26165102

Kannan, V., Bastas, K. y Devi, R. (2015). Scientific and economic impact of plant pathogenic bacteria. In Sustainable Approaches to Controlling Plant Pathogenic Bacteria. eds. V. R. Kannan and K. K. Bastas (Boca Raton, FL, CRC Press), 369-392.

Kauffmann, A.C. y Castro, V.S. (2023). Phenolic Compounds in Bacterial Inactivation: A Perspective from Brazil. *Antibiotics*, *12*(4), 645. https://doi.org/10.3390/antibiotics12040645

Khakimov, A., Salakhutdinov, I., Omolikov, A. y Utaganov, S. (2022). Traditional and current-prospective methods of agricultural plant diseases detection: A review. *IOP Conference Series.: Earth and Environmental Science, 951*, 012002. 10.1088/1755-1315/951/1/012002

Khameneh B, Eskin NAM, Iranshahy M, y Fazly Bazzaz BS. (2021). Phytochemicals: A Promising Weapon in the Arsenal against Antibiotic-Resistant Bacteria. Antibiotics, 10(9), 1044.10.3390/antibiotics10091044

Kharadi, R.R. y Sundin, G.W. (2021). Dissecting the process of xylem colonization through biofilm formation in *Erwinia amylovora. Journal of Plant Pathology, 103*, 41-49. https://doi.org/10.1007/s42161-020-00635-x

Kharadi, R.R., Schachterle, J.K., Yuan, X., Castiblanco, L.F., Peng, J., Slack, S.M., Zeng, Q. y Sundin, G.W. (2021). Genetic Dissection of the *Erwinia amylovora Disease* Cycle. *Annual Review of Phytopathology, 59*, 191-212. https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-020620-095540

Košćak, L., Lamovšek. J., Đermić, E., Prgomet, I. y Godena, S. (2023). Microbial and Plant-Based Compounds as Alternatives for the control of phytopathogenic bacteria. *Horticulturae, 9*(10), 1124. https://doi.org/10.3390/horticulturae9101124

Lee, H.B., Patriarca, A. y Magan, N. (2015). Erratum to *Alternaria* in food: ecophysiology, mycotoxin production and toxicology. *Mycobiology, 43*, 93-106. 10.5941/MYCO.2015.43.3.371

Li L, Zhu X-M, Zhang Y-R, Cai Y-Y, Wang J-Y, Liu M-Y, Wang J-Y, Bao J-D. y Lin F-C. (2022). Research on the molecular interaction mechanism between plants and pathogenic fungi. *International Journal of Molecular Sciences, 23*(9), 4658. https://doi.org/10.3390/ijms23094658

Li X, Wang Q, Li H, Wang X, Zhang R, Yang X, Jiang Q. y Shi Q. (2023). Revealing the Mechanisms for Linalool Antifungal Activity against *Fusarium oxysporum* and Its Efficient Control of Fusarium Wilt in Tomato Plants. *International Journal of Molecular Sciences*, *24*(1), 458. https://doi.org/10.3390/ijms24010458

Lin, Y., Fan, L., Xia, X., Wang, Z., Yin, Y., Cheng, Y. y Li, Z. (2019). Melatonin decreases resistance to postharvest green mold on citrus fruit by scavenging defense-related reactive oxygen species. *Postharvest Biology and Technology, 153*, 21–30. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.03.016

López-Muñoz, N.R., Romero-Bastidas, M., Arce-Amézquita, P.M. y Hernández-

Rubio, J.S. (2019). Antifungal activity of antioxidants derived from four cultivars of *Capsicums* pp. against phytopathogenic fungi. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios, 6*(18), 487-498. https://doi.org/10.19136/era.a6n18.2174 .

López-Romero, J.C., Torres-Moreno, H., Ireta-Paredes, A.D.R., Charles-Rodríguez, A.V. y Flores-López, M.L. (2023). Chemical and Bioactive Compounds from Mexican Desertic Medicinal Plants. En *Aromatic and Medicinal Plants of Drylands and Deserts: Ecology, Ethnobiology and Potential Uses* (pp. 189-218). CRC Press. 10.1201/9781003251255-9

Mahizan, N.A., Yang, S.K., Moo, C.L., Song, A.A.L., Chong, C.M., Chong, C.W., Abushelaibi, A., Lim, S.H.E. y Lai, K.S. (2019). Terpene Derivatives as a Potential Agent against Antimicrobial Resistance (AMR) Pathogens. *Molecules*, *24*(14), 2631. https://doi.org/10.3390/molecules24142631

Mahmood, B., Jamil, M., Shafique, S., Khan, M.R., Zafar, T., Bhatti, R.M., Qayyum, H., Tasneem, K., Younas, M.T. y Kakar, M.A. (2023). Evaluating the biocontrol efficacy of selected botanical extracts against bacterial spot of tomato. *Plant Protection, 07*(2), 255-261. https://doi.org/10.33804/pp.007.02.4726

Martínez-Ávila, G.C.G., Aguilar-Zarate, P. y Rojas R. (2021). Currently Applied Extraction Processes for Secondary Metabolites from *Lippia turbinata* and *Turnera diffusa* and Future Perspectives. *Separations, 8*(9), 158. https://doi.org/10.3390/separations8090158

Martins, P.M.M., Merfa, M.V., Takita M.A. y De Souza, A.A. (2018) Persistence in Phytopathogenic Bacteria: Do We Know Enough? *Frontiers in Microbiology, 9*, 1099. https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01099

Méndez, M., Rodríguez, R., Ruiz, J., Morales-Adame, D., Castillo, F., Hernández-Castillo, F.D. y Aguilar, C.N. (2012). Antibacterial activity of plant extracts obtained with alternative organics solvents against food-borne pathogen bacteria. *Industrial Crops and Products, 37*(1), 445-450. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.07.017

Meza Ucella-Filho, J.G., da Silva Monteiro Freire, A., Campos Carréra, J., Moura Fonseca Lucas, F., Zucolotto, S.M., Dias Júnior, A.F. y Akira Mori, F. (2022). Tannin-rich bark extract of plants as a source of antimicrobial bioactive compounds: A bibliometric analysis. *South African Journal of Botany. 150*, 1038-1050. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2022.09.018

Mitrović, I., Grahovac, J., Hrustić, J., Jokić, A., Dodić, J., Mihajlović, M., y Grahovac, M. (2021). Utilization of waste glycerol for the production of biocontrol agents nigericin and niphimycin by Streptomyces hygroscopicus: bioprocess development. *Environmental Technology, 43*(19), 3000-3013. https://doi.org/10.1080/09593330.2021.1913241

Morales-Márquez, R., Delgadillo-Ruiz, L., Esparza-Orozco, A., Delgadillo-Ruiz, E., Bañuelos-Valenzuela, R., Valladares-Carranza, B., Chávez-Ruvalcaba, M. I., Chávez-Ruvalcaba, F., Valtierra-Marín,

H. E., Gaytán-Saldaña, N. A., Mercado-Reyes, M., & Arias-Hernández, L. A. (2025). Evaluation of *Larrea tridentata* Extracts and Their Antimicrobial Effects on Strains of Clinical Interest. *International Journal of Molecular Sciences*, *26*(3), 1032. https://doi.org/10.3390/ijms26031032

Morales-Ubaldo, A. L., Rivero-Perez, N., Valladares-Carranza, B., Madariaga-Navarrete, A., Higuera-Piedrahita, R. I., Delgadillo-Ruiz, L., Bañuelos-Valenzuela, R. y Zaragoza-Bastida, A. (2022). Phytochemical Compounds and Pharmacological Properties of *Larrea tridentata*. *Molecules*, *27*(17), 5393. https://doi.org/10.3390/molecules27175393

Nag, P., Paul, S., Shriti, S. y Das, S. (2022). Defense response in plants and animals against a common fungal pathogen, *Fusarium oxysporum*, *Current Research in Microbial Sciences*, *3*, 100135. https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2022.100135

Neri F., Cappellin L., Spadoni A., Cameldi I., Alarcon A.A., Aprea E., Romano A., Gasperi F. y Biasioli F. (2015). Role of strawberry volatile organic compounds in the development of Botrytis cinerea infection. *Plant Pathology, 64*, 709-717. doi: 10.1111/ppa.12287

Nicoletti, R. y Trincone, A. (2016). Bioactive compounds produced by strains of Penicillium and Talaromyces of marine origin. *Marine Drugs,14*(2), 37. https://doi.org/10.3390/md14020037

Niño, J., Mosquera, O.M. y Correa, Y.M. (2012). Antibacterial and antifungal activities of crude plant extracts from Colombian biodiversity. *Revista de Biología Tropical*, *60*(4), 1535-1542.

Ochoa, C.G., Villarreal-Guerrero, F., Prieto-Amparán, J., Garduño, H.R., Huang, F. y Ortega-Ochoa, C. (2023). Precipitation, vegetation, and groundwater relationships in a rangeland ecosystem in the Chihuahuan desert, Northern Mexico. Hydrology, *10*(2), 41. https://doi.org/10.3390/hydrology10020041

Oliva-Rodríguez, A.G., Cervantes-Güicho, V.dJ., Morales-Martínez, T.K., Rodríguez-De la Garza, J.A., Medina-Morales, M.A., Martínez-Amador, S.Y., Reyes, A.G. y Ríos-González, L.J. (2023). Biohydrogen Gas/Acetone-Butanol-Ethanol Production from Agave Guishe Juice as a Low-Cost Growing Medium. *Fermentation*, 9(9), 811. https://doi.org/10.3390/fermentation9090811

Pacios Michelena, S., Aguilar González, C.N., Álvarez Pérez, O.B., Rodríguez-Herrera, R., Chávez González, M., Arredondo-Valdés, R., Ascacio Valdés, J.A., Govea Salas, M. y Ilyina, A. (2021). Application of Streptomyces Antimicrobial Compounds for the Control of Phytopathogens. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *5*, 696518. https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.696518

Palmieri, D., Ianiri, G., Del Grosso, C., Barone, G., De Curtis, F., Castoria, R. y Lima, G. (2022). Advances and Perspectives in the Use of Biocontrol Agents against Fungal Plant Diseases. *Horticulturae*, *8*(7), 577. https://doi.org/10.3390/horticulturae8070577

Palomo-Ligas, L., Nery-Flores, S.D., García-Ortiz, J.D., Pérez-Juárez, C.M., Ascacio-Valdés, J.A., Flores-Gallegos, A.C., Rodríguez-Herrera, R. y Cruz-Requena, M. (2022). Molecular effects of bioactive

compounds from semi desert plant and their use as potential ingredient in food products. En: *Functional Foods and Molecular Mechanisms: Frontier Between Health and Disease*. (pp. 142-192). Wiley. https://doi.org/10.1002/9781119804055.ch6

Pandey, A.K., Kumar, P., Singh, P., Tripathi, N.N. y Bajpai, V.K. (2017). Essential oils: Sources of antimicrobials and food preservatives. *Frontiers in Microbiology, 7*, 2161. https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.02161

Papoutsis, K., Mathioudakis, M.M., Hasperué, J.H. y Ziogas, V. (2019). Non-chemical treatments for preventing the postharvest fungal rotting of citrus caused by *Penicillium digitatum* (green mold) and *Penicillium italicum* (blue mold). Trends Food Science and Technology, 86, 479–491. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.053

Peng, Y., Li, S.J., Yan, J., Tang, Y., Cheng, J.P., Gao, A.J., Yao, X., Ruan, J.J. y Xu, B.L. (2021) Research Progress on Phytopathogenic Fungi and Their Role as Biocontrol Agents. *Frontiers in Microbiology, 12*, 670135. https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.670135

Peng. J., Schachterle, J.K. y Sundin, G.W. (2021). Orchestration of virulence factor expression and modulation of biofilm dispersal in *Erwinia amylovora* through activation of the Hfq-dependent small RNA RprA. *Molecular Plant Pathology, 22*, 255-270. https://doi.org/10.1111/mpp.13024

Pérez-Pérez, J.U., Guerra-Ramírez, D., Reyes-Trejo, B., Cuevas-Sánchez, J.A. y Guerra-Ramírez, P. (2020). Actividad antimicrobiana in vitro de extractos de *Jatropha dioica* Seseé contra bacterias fitopatógenas de tomate. *Polibotánica, 49*(25), 125-133. https://doi.org/10.18387/polibotanica.49.8

Peritore-Galve, F.C., Tancos, M.A. y Smart, C.D. (2021). Bacterial Canker of Tomato: Revisiting a Global and Economically Damaging Seedborne Pathogen. *Plant Disease, 105*, 1581-1595. https://doi.org/10.1094/PDIS-08-20-1732-FE

Ramírez-Méndez, J.E., Hernández-Castillo, F.D., Tucuch Pérez, M.A., Camacho Aguilar, I.I., Arredondo Valdés, R. y Villarreal Quintanilla, J.A. (2023). Efectividad biológica de extractos de *Agave striata* y *Fouquieria splendens* contra *Clavibacter michiganensis* subsp. *Michiganensis*. *Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud, 25*(1), 34-42. https://doi.org/10.18633/biotecnia.v25i1.1751

Ramírez-Moreno, A, Delgadillo-Guzmán, D., Bautista-Robles, V., Marszalek, J.E., Keita, H., Kourouma, A., Ramírez-García, S.A., Rodríguez-Amado, J.R. y Tavares-Carvalho, J.C. (2020). *Jatropha dioica*, an Aztec plant with promising pharmacological properties: A systematic review. *African Journal of Pharmacy and Pharmacology, 14*(6), 169-178. https://doi.org/10.5897/AJPP2020.5147

Ramírez-Rodríguez, Y., Martínez-Huélamo, M., Pedraza-Chaverri, J., Ramírez, V., Martínez-Tagüeña, N. y Trujillo, J. (2019). Ethnobotanical, Nutritional and Medicinal Properties of Mexican Drylands Cactaceae Fruits: Recent Findings and Research Opportunities. *Food Chemistry, 312*, 126073.

https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.126073

Rodríguez García, S. L. y Raghavan, V. (2021). Green extraction techniques from fruit and vegetable waste to obtain bioactive compounds—A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 62*, 6446-6466. https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1901651

Rodríguez-Castro, A., Torres-Herrera, S., Domínguez-Calleros, A., Romero-García, A. y Silva-Flores, M. (2020). Extractos vegetales para el control de *Fusarium oxysporum*, *Fusarium solani* y *Rhizoctonia solani*, una alternativa sostenible para la agricultura. *Abanico Agroforestal, 2*, 1-13. http://dx.doi.org/10.37114/abaagrof/2020.7

Rodríguez-Guadarrama, A.H., Guevara-González, R.G., Romero-Gómez, S.J. y Feregrino-Pérez, A.A. (2018). Antifungal activity of Mexican endemic plants on agricultural phytopathogens: a review," *2018 XIV International Engineering Congress (CONIIN)*, Queretaro, 1-11. 10.1109/CONIIN.2018.8489793

Rojas, R., Tafolla-Arrellano, J.C. y Martínez-Ávila, G.C.G. (2021). *Euphorbia antisyphilitica* Zucc: A Source of Phytochemicals with Potential Applications in Industry. *Plants, 10*(1), 8. https://doi.org/10.3390/plants10010008

Saldaña-Mendoza, S.A., Pacios-Michelena, S., Palacios-Ponce, A.S., Chávez-González, M.L. y Aguilar, C.N. (2023). *Trichoderma* as a biological control agent: mechanisms of action, benefits for crops and development of formulations. *World Journal of Microbiology and Biotechnology, 39*(10), 269. DOI: 10.1007/s11274-023-03695-0

Sánchez Robles, J.H., Luna Enríquez, C.F., Reyes, A.G., Cruz Requena, M., Ríos González, L.J., Morales Martínez, T.K., Ascacio Valdés, J.A. y Medina Morales, M.A. (2023). Initial Study of Fungal Bioconversion of *guishe* (*Agave lechuguilla* Residue) Juice for Bioherbicide Activity on Model Seeds. *Fermentation*, 9(5), 421. https://doi.org/10.3390/fermentation9050421

Schmey, T., Tominello-Ramirez, C.S., Brune, C. y Stam, R. (2024) Alternaria diseases on potato and tomato. *Molecular Plant Pathology, 25*(3), e13435. https://doi.org/10.1111/mpp.13435

Sil, A., Pramanik, K., Samantaray, P., Mondal, M.F. y Yadav, V. (2020). Essential oils: A boon towards eco-friendly management of phytopathogenic fungi. *Journal of Entomology and Zoology Studies, 8*(4), 1884-1891.

Šovljanski, O., Kljakić, A.C. y Tomić, A. (2023). Antibacterial and Antifungal Potential of Plant Secondary Metabolites. En: Mérillon, JM., Ramawat, K.G. (eds). *Plant Specialized Metabolites. Reference Series in Phytochemistry*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30037-0_6-1

Steglińska, A., Bekhter, A., Wawrzyniak, P., Kunicka-Styczynska, A., Jastrzabek, K., Fidler, M., Smigielski, K. y Gutarowska, B. (2022). Antimicrobial Activities of Plant Extracts against *Solanum tuberosum* L. Phytopathogens. *Molecules, 27*, 1579. https://doi.org/10.3390/molecules27051579

Talibi, H., Boubaker, E.H., Boudyach, A., y Aoumar, A.B. (2014). Alternative methods for the control of postharvest citrus diseases, *Journal of Applied Microbiology, 117*(1), 1-17. https://doi.org/10.1111/jam.12495

Toghueo, R.M.K. y Boyom, F.F. (2020). Endophytic *Penicillium* species and their agricultural, biotechnological, and pharmaceutical applications. *3 Biotech, 10*(3), 107. 10.1007/s13205-020-2081-1

Torres-Leon, C., Rebolledo-Ramírez, F., Aguirre-Joya, J.A., Ramírez-Moreno, A., Chávez-González, M.L., Aguillón-Gutierrez, D.R., Camacho-Guerra, L., Ramírez-Guzmán, N., Hernández Velez, S. y Aguilar, C.N. (2023). Medicinal plants used by rural communities in the arid zone of Viesca and Parras Coahuila in northeast Mexico. *Saudi Pharmaceutical Journal, 31*, 21-28. https://doi.org/10.1016/j.jsps.2022.11.003

Tucuch-Pérez, M.A., Arredondo-Valdés, R. y Hernández-Castillo, F.D. (2020). Actividad antifúngica de compuestos fitoquímicos de extractos de plantas del semidesierto mexicano contra *Fusarium oxysporum* del tomate por el método de micro dilución en placa. *Ciencias Naturales e Ingenierías, 1*2(25). DOI: https://doi.org/10.21640/ns.v12i25.2345

Tucuch-Pérez, M.A., Bojórquez-vega, J.J., Arredondo-Valdés, R., Hernández-Castillo, F.D. y Anguiano-Cabello, J.C. (2021). Actividad biológica de extractos vegetales del semidesierto mexicano para manejo de *Fusarium oxysporum* de tomate. *Ecosistemas y recursos Agropecuarios, 8*(2), e2745. https://doi.org/10.19136/era.a8n2.2745

Ullah, R. y Wiedmer, S.K. (2025). Potential biopesticides from *Datura alba* and *Calotropis gigantea:* Extraction, analysis, and reported compounds. *Crop Protection, 188*, 107009. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2024.107009

Valero-Mendoza, A. G., Nuncio, A., Govea Salas, M., Zugasti-Cruz, A., Ríos-González, L. J., Ascacio-Valdés, J. A., Morales-Martínez, T. K., Cruz-Requena, M., & Medina-Morales, M. A. (2025). Bioactive Properties of Polyphenolic Extracts from *Flourensia cernua* Obtained by Emerging Technologies Under a Taguchi L18 Orthogonal Array. Processes, 13(11), 3725. https://doi.org/10.3390/pr13113725

Vásquez Ramírez, L.M. y Castaño Zapata, J. (2017). Manejo integrado de la marchitez vascular del tomate [*Fusarium oxysporum f. sp. lycopersici* (Sacc.) W.C. Snyder & H.N. Hansen]: una revisión. *Revista U.D.C.A Actualidad y Divulgación Científica, 20*(2): 363-374.

Veloso, J. y van Kan, J.A.L. (2018). Many Shades of Grey in Botrytis-Host Plant Interactions. *Trends in Plant Science, 23*(7), 613-622. 10.1016/j.tplants.2018.03.016

Vernès, L., Vian, M. y Chemat, F. (2020). Ultrasound and Microwave as Green Tools for Solid-Liquid Extraction, Colin F. Poole, (Eds.), En *Handbooks in Separation Science, Liquid-Phase Extraction*, (pp. 355-374). Elsevier.https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816911-7.00012-8

Vidha, S., Patra K., Pai, H., Aguilar-Pontes, M.V., Berasategui, A., Kamble, A., Di Pietro, A. y Redkar, A. (2024). Molecular Dialogue During Host Manipulation by the Vascular Wilt Fungus *Fusarium oxysporum*. *Annual Review of Phytopathology, 62*, 97-126. https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-021722-034823

Vlajkov, V., Pajčin, I., Loc, M., Budakov, D., Dodić, J., Grahovac, M. y Grahovac, J. (2022). The Effect of Cultivation Conditions on Antifungal and Maize Seed Germination Activity of Bacillus-Based Biocontrol Agent. *Bioengineering*, *9*(12), 797. https://doi.org/10.3390/bioengineering9120797

Wang, H., Guo, Y., Luo, Z., Gao, L., Li, R., Zhang, Y., Kalaji, H. M., Qiang, S. y Chen, S. (2022). Recent Advances in *Alternaria* Phytotoxins: A Review of Their Occurrence, Structure, Bioactivity, and Biosynthesis. *Journal of Fungi*, *8*(2), 168. https://doi.org/10.3390/jof8020168

Xie, Y., Yang, W., Tang, F., Chen. X. y Ren. L. (2015). Antibacterial activities of flavonoids: structure-activity relationship and mechanism. *Current Medicinal Chemistry*, *22*(1), 132-49. 10.2174/0929867321666140916113443

Yuan, G., Guan, Y., Yi, H. Lai, S., Sun, Y. y Cao, S. (2021). Antibacterial activity and mechanism of plant flavonoids to gram-positive bacteria predicted from their lipophilicities. *Scientific Report*, *11*, 10471. 10.1038/s41598-021-90035-7

Zhang, Z., Chen, Y., Li, B., Chen, T. y Tian, S. (2020). Reactive oxygen species: A generalist in regulating development and pathogenicity of phytopathogenic fungi. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, *18*, 3344-3349. https://doi.org/10.1016/j.csbj.2020.10.024

Zhu, H., Zhao, L., Zhang, X., Foku, J. M., Li, J., Hu, W. y Zhang, H. (2019). Efficacy of *Yarrowia lipolytica* in the biocontrol of green mold and blue mold in *Citrus reticulata* and the mechanisms involved. *Biological Control*, *139*, 104096. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2019.104096

Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Potencial terapéutico de *Hamelia patens* Jacq. en la prevención de la dislipidemia en el síndrome metabólico

Therapeutic potential of *Hamelia patens* Jacq. in the prevention of dyslipidemia in metabolic syndrome

Rangel-Vázquez, G.[1], Reyes-Munguía, A.[1]*, Cariño-Cortés, R.[2], Alvarado-Sánchez, B.[1]

[1] Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Facultad de Estudios Profesionales Zona Huasteca. Romualdo del Campo 501, Fracc. Rafael Curiel 501, Cd. Valles, S.L.P., México. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-3473-8943, https://orcid.org/0000-0002-2151-7979*, https://orcid.org/0000-0002-6077-2665.
[2] Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias de la Salud. Calle Dr. Eliseo Ramírez Ulloa 400, Col. Doctores, Pachuca de Soto, Hidalgo, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4776-3534.
a293316@alumnos.uaslp.mx; abigail.reyes@uaslp.mx*; raquel_carino4897@uaeh.edu.mx; balvarado@uaslp.mx

Innovación tecnológica: Uso de compuestos bioactivos vegetales como agentes preventivos en la dislipidemia aterogénica.

Área de aplicación industrial: Alimentos funcionales y nutracéuticos, industria farmacéutica.

Recibido: 12 noviembre 2025
Aceptado: 05 marzo 2026

Abstract

Atherogenic dyslipidemia is characterized by the presence of hypertriglyceridemia, plasma accumulation of small dense LDL particles (sdLDL), and increased proinflammatory cytokines such as IL-6. These alterations favor the penetration and oxidation of sdLDL in the arterial wall, promoting the accumulation of these particles in the subendothelial space, which leads to the formation of foam cells and the development of atherosclerotic plaque. This process represents one of the main mechanisms involved in the development of cardiovascular disease (CVD). Due to the adverse effects that some patients may experience with statin and fibrate therapies, the potential of plant-derived bioactive compounds as a preventive strategy has been investigated. H. patens is a plant with promising potential due to the presence of phenolic bioactive compounds. This review analyzes the potential of H. patens bioactive compounds as a therapeutic alternative in the prevention of dyslipidemia, reviewing their chemical composition, biological effects, and proposed mechanisms of action by reviewing current scientific evidence. Research has shown that these compounds can regulate lipid metabolism by modulating oxidative stress and the inflammatory response, conditions that favor the progression of dyslipidemia. These effects are associated with

the modulation of the activity of the transcription factors NF-kB and Nfr2, along with the upregulation or downregulation of enzymes involved in hepatic lipogenesis such as HMG-CoA reductase, carnitine palmitoyltransferase, and fatty acid synthase. In conclusion, H. patens is a promising source of bioactive compounds with preventive potential for dyslipidemia; however, further research is needed to support its clinical efficacy.

Keywords: Phenolic compounds, Atherogenic dyslipidemia, Molecular mechanisms.

Resumen

La dislipidemia aterogénica se distingue por la presencia de hipertrigliceridemia, acumulación plasmática de partículas LDL pequeñas y densas (sdLDL), así como el aumento de citocinas proinflamatorias como la IL-6. Estas alteraciones favorecen la penetración y oxidación de las sdLDL en la pared arterial, promoviendo la acumulación de estas partículas en el espacio subendotelial, lo que conduce a la formación de células espumosas y al desarrollo de la placa ateroesclerótica. Este proceso representa uno de los principales mecanismos involucrados en el desarrollo de enfermedades cardiovasculares (ECV). Debido a los efectos adversos que algunas personas pueden presentar en las terapias farmacológicas con estatinas y fibratos, se ha investigado el potencial de los compuestos bioactivos de origen vegetal como estrategia preventiva. *H. patens* es una planta con un potencial prometedor gracias a la presencia de compuestos bioactivos de tipo fenólico. Esta revisión analiza el potencial de los compuestos bioactivos de *H. patens* como una alternativa terapéutica en la prevención de la dislipidemia, revisando su composición química, efectos biológicos y mecanismos de acción propuestos mediante la revisión de evidencia científica actual. Las investigaciones han reportado que estos compuestos pueden regular el metabolismo lipídico mediante la modulación del estrés oxidativo y la respuesta inflamatoria, condiciones que favorecen la progresión de la dislipidemia. Estos efectos se asocian con la modulación de la actividad del factor de transcripción NF-kB y el Nfr2, junto con el aumento o disminución de enzimas que participan en la lipogénesis hepática como la HMG-CoA reductasa, carnitina palmitil transferasa y la sintasa de ácidos grasos. Concluyendo que *H. patens* es una fuente prometedora de compuestos bioactivos con potencial preventivo para la dislipidemia, sin embargo, se requieren de más investigaciones que respalden efectividad.

Palabras clave: Compuestos fenólicos, Dislipidemia aterogénica, Mecanismos moleculares.

1. Introducción

El síndrome metabólico (SM) representa un serio problema de salud pública a nivel mundial. En México, se estima una prevalencia de 36.5 millones de adultos, de acuerdo con datos recopilados de la Encuesta Nacional de Salud y Nutrición (ENSANUT) (Rojas-Martínez et al., 2021). El SM se caracteriza por un conjunto de alteraciones metabólicas, como obesidad abdominal, hipertensión arterial, hiperglucemia y dislipidemia aterogénica. En este contexto, la dislipidemia aterogénica representa un componente central del SM y se define por la presencia de hipertrigliceridemia, disminución de HDL, predominio de partículas LDL pequeñas y densas (sdLDL) e incremento de citocinas proinflamatorias

como la interleucina 6 (IL-6), interleucina 1-β (IL-1-β) y el factor de necrosis tumoral α (TNF-α) (Boarescu et al., 2022; Cho & Lee, 2022). Estas alteraciones favorecen la acumulación de colesterol en la pared arterial y la progresión de la ateroesclerosis, constituyendo un elemento clave en el desarrollo de enfermedades cardiovasculares (ECV), las cuales representan la principal causa de mortalidad a nivel mundial (Boarescu et al., 2022; Thongtang et al., 2022). El tratamiento de las dislipidemias involucra la administración de fármacos como las estatinas y fibratos, los cuales pueden presentar reacciones adversas como daño hepático, mialgia, miopatías, diabetes y colelitiasis (Hu et al., 2022). Por esta razón, ha aumentado el interés en la investigación de compuestos bioactivos de origen vegetal como estrategia alternativa para la prevención y manejo de las dislipidemias. En este sentido, los antioxidantes juegan un papel fundamental al contrarrestar el estrés oxidativo (EO) ocasionado por el desequilibrio de radicales libres y antioxidantes, incluyendo las especies reactivas de oxígeno (ROS) (Forman & Zhang, 2021). Este proceso conduce a la peroxidación lipídica, fenómeno implicado en la fisiopatología de la dislipidemia aterogénica (Khatana et al., 2020). Las plantas son un reservorio natural de antioxidantes, un ejemplo es *Hamelia patens* Jacq., planta rica en compuestos bioactivos, tales como saponinas, flavonoides, compuestos fenólicos, alcaloides, glucósidos y esteroles, compuestos que exhiben potencial terapéutico para la prevención de enfermedades crónicas no transmisibles, como trastornos cardiovasculares e inflamatorios (Llauradó-Maury et al., 2020; Noor et al., 2020). Principalmente, los compuestos fenólicos presentes en *H. patens* como epicatequina, catequina, kaempferol, apigenina y ácido cafeico, han demostrado la capacidad para modular procesos metabólicos relacionados con la dislipidemia, incluyendo la neutralización de radicales libres y, por lo tanto, la inhibición de la oxidación de las LDL (Gutiérrez-Sánchez et al., 2022; Scavuzzi & Dichi, 2025). Recientemente, en un metaanálisis realizado por Kiyimba et al. (2023), se observó que los polifenoles presentes en los alimentos aumentaron las concentraciones de HDL y disminuyeron las de triglicéridos y colesterol total.

Por lo anterior, el objetivo de este trabajo es analizar el potencial de los compuestos bioactivos de *H. patens* como una alternativa terapéutica en la prevención de la dislipidemia en el síndrome metabólico, revisando su composición química, efectos biológicos y mecanismos de acción propuestos mediante la revisión de evidencia científica actual.

2. Clasificación de las dislipidemias

Las dislipidemias son un trastorno metabólico asintomático, caracterizado por una alteración del perfil lipídico. Se evidencia con niveles elevados de colesterol total (CT), triglicéridos (TG) y lipoproteínas de baja densidad (LDL), o con niveles bajos de lipoproteínas de alta densidad (HDL) (Jacobsen et al., 2023; Thongtang et al., 2022).

Se pueden clasificar en dos categorías: primarias y secundarias. Las dislipidemias primarias están relacionadas a mutaciones genéticas que provocan una eliminación deficiente o producción excesiva de TG y LDL, o bien, una producción escasa o una eliminación excesiva de HDL (Purva et al., 2020). Por otro lado, las causas principales de las dislipidemias secundarias se asocian con un estilo de vida poco saludable y a condiciones médicas adquiridas, ejemplo de ello son: el sedentarismo, una ingesta excesiva de grasas saturadas, grasas trans y colesterol a través de la dieta, consumo

elevado de alcohol, tabaquismo, y enfermedades como el síndrome nefrótico, hipotiroidismo, enfermedad renal crónica, diabetes, obesidad y las enfermedades hepáticas colestásicas (Yanai & Yoshida, 2021).

3. El rol de la dislipidemia en la aterogénesis

Las bases fisiopatológicas de las dislipidemias implican interacciones complejas entre factores genéticos, metabólicos y ambientales que afectan el equilibrio metabólico de los lípidos (Halli-Demeter & Braun, 2022). La dislipidemia aterogénica se caracteriza por un aumento de TG, niveles bajos de HDL, acumulación de remanentes de lipoproteínas, como lipoproteínas de densidad intermedia (IDL) y lipoproteínas de muy baja densidad (VLDL), y acumulación de partículas LDL pequeñas y densas (sdLDL) (Lorenzatti & Toth, 2020). Está estrechamente relacionada con la resistencia a la insulina, la obesidad y la inflamación crónica (tabla 1). Además, contribuye al desarrollo y progresión de la enfermedad cardiovascular ateroesclerótica (Fahed et al., 2022; Lorenzatti & Toth, 2020).

Tabla 1. Mecanismos fisiopatológicos clave de la dislipidemia aterogénica.

Factor	Consecuencia clínica	Referencia
Resistencia a la insulina en tejidos grasos	• Inhibición de la lipolisis mediada por la insulina. • Aumento de ácidos grasos libres circulantes (AGL). • Aumento de la síntesis de ésteres de colesterol, TG y VLDL ocasionada por las altas concentraciones de los AGL. • Activación de la proteína de transferencia de ésteres de colesterol (PTEC), proteína que promueve el aclaramiento de HDL y favorece la formación de LDL.	(Fahed et al., 2022)
Obesidad	• Aumento del tejido adiposo y del contenido de colesterol libre de hasta un 50% en los adipocitos. • Hipertrofia de los adipocitos. • Aumento de la apoproteína C-III (apo C-III) que inhibe la actividad de la lipoproteinlipasa (LPL), enzima que participa en la degradación de TG.	(Bays et al., 2024)
Inflamación crónica	• Liberación de la IL-6 por los macrófagos y adipocitos, favoreciendo un estado protrombótico al elevar los niveles de fibrinógeno. • Producción de TNF-α dentro del tejido adiposo, alterando la señalización de insulina en los adipocitos y hepatocitos. • Activación de vías de señalización inflamatorias por los receptores tipo Toll (TLRs)	(Fahed et al., 2022)
Estrés oxidativo	• El desequilibrio en la homeostasis redox induce una cadena de reacción que genera especies reactivas de oxígeno (ROS). • Peroxidación lipídica producida por las ROS. • Disfunción endotelial.	(Bereda, 2022; Khatana et al., 2020)

3.1. Fisiopatología de la ateroesclerosis

Un nivel alto de colesterol puede llevar a su acumulación con una posterior oxidación en arterias. Particularmente, la acumulación subendotelial de residuos de LDL y VLDL aceleran la activación del factor de transcripción nuclear-κB (NF-κB), lo que a su vez estimula la producción de receptores proinflamatorios, citocinas y la expresión de moléculas de adhesión como la molécula de adhesión celular vascular 1 (VCAM-1) y la selectina endotelial (P-selectina), facilitando la migración y adherencia de los monocitos (Blagov et al., 2024). Por otro lado, la ApoB-100, una lipoproteína que forma parte de las LDL sufre una oxidación (ox-LDL), las

cuales son ligandos clave para los receptores scavenger de clases A y B presentes en los macrófagos derivados del proceso de diferenciación de los monocitos (Blagov et al., 2024). Los macrófagos captan las ox-LDL transformándose en células espumosas que se acumulan en las paredes de los vasos sanguíneos. Estas interacciones desencadenan la producción de citocinas proinflamatorias como la interleucina 6 (IL-6), interleucina 1 (IL-1) y el factor de necrosis tumoral α (TNF-α), además de la síntesis de la proteína quimioatrayente de monocitos (MCP-1), favoreciendo el reclutamiento de más macrófagos y el aumento de la cantidad de células espumosas (Bereda, 2022; Blagov et al., 2024). Este proceso promueve la formación de la placa ateroesclerótica, aumentado el riesgo de desarrollo de enfermedades cardiovasculares.

4. *Hamelia patens* Jacq.

Hamelia patens Jacq. es una planta ornamental que pertenece a la familia de las *Rubiaceae*, dependiendo de la región se le conoce como madura-platano, zapote, trompetilla, coloradillo, tres hojitas o chichipín (figura 1) (Kaushik & Singh, 2020). Es un arbusto perenne que tolera bien la sequía y el calor, crece en todo tipo de suelos, originario de Latinoamérica, abarcando regiones tropicales y subtropicales que van desde México hasta Argentina (Noor et al., 2020; Valle-Ortiz et al., 2025). En la medicina tradicional, la infusión o decocción de las hojas se emplea en humanos para el tratamiento de diversos padecimientos como problemas dérmicos, fiebre, dolor de cabeza, reumatismo y para disminuir la inflamación y acelerar el proceso de cicatrización de heridas cutáneas (López-Román et al., 2025).



Figura 1. Planta de *Hamelia patens* Jacq. Fotografía original tomada por los autores.

4.1. Composición fitoquímica

De acuerdo con la investigación realizada por Gutiérrez-Sánchez et al., (2022), el extracto etanólico de *H. patents* es rico en compuestos fenólicos tales como, escopoletina, catequina, epicatequina, *apigenina*, quercetina, kaempferol y ácido cafeico. Además, también se han identificado la presencia de ácido clorogénico, ácido rosmarínico, rutina y pirogalol en extracto metanólico (El-Sawi et al., 2021). Siendo rutina, kaempferol, quercetina, ácido clorogénico y epicatequina los polifenoles más abundantes (Valle-Ortiz et al., 2025).

4.2. Efectos de los principales compuestos bioactivos de la planta *H. patens*

Los compuestos fenólicos se han identificado como antioxidantes directos debido a su estructura química y a la capacidad de eliminación de ROS (Feldman et al., 2021). Su efecto antioxidante se atribuye al potencial redox que les permite actuar como donadores de hidrógeno o agentes quelantes de iones metálicos, facilitando la supresión del estrés oxidativo. Asimismo, contribuyen a mejorar la sensibilidad a la insulina y a contrarrestar la inflamación a través de distintos

mecanismos, principalmente mediante la inhibición del NF-κB (Gasmi et al., 2022). En la tabla 2 se muestra un resumen de los efectos que ejercen los principales compuestos fenólicos de *H. patens* en la regulación del metabolismo lipídico.

Tabla 2. Efecto de los principales compuestos fenólicos de *H. patens* en la regulación del metabolismos lipídico.

Compuesto	Efecto	Referencia
Ácido clorogénico	• Inhibición del aumento de peso y disminución de los niveles de CT, TG y LDL en ratones C57BL/6 alimentados con una dieta alta en grasas. • Reducción de la enzima hepática alanina aminotransferasa (ALT).	(Ye et al., 2022)
Ácido rosmarínico	• Reducción de la ganancia de peso corporal, CT, triglicéridos y lípidos hepáticos en ratones macho C57BL/6 alimentados con una dieta alta en grasas. • Activación de la proteína quinasa activada por AMP (AMPK), regulador clave en el proceso de β-oxidación de ácidos grasos.	(Nyandwi et al., 2021)
Catequina	• Los ratones macho C57BL/6 diabéticos inducidos con estreptozotocina tratados con epicatequina mostraron una disminución de los niveles de hemoglobina glicosilada, glucosa en sangre, triglicéridos, CT y leptina, y un aumento de insulina y adiponectina. • Aumento del receptor activado por el proliferador de peroxisomas α (PPARα) y disminución del PPARϒ. • Activación AMPK.	(Lin et al., 2017)
Escopoletina	• Disminución de los niveles plasmáticos de TG, CT, LDL y de las concentraciones de malondialdehído (MDA) en hígado, y aumento de HDL en ratones macho C57BL/6 con hiperlipidemia inducida con tyloxapol. • Reducción de los niveles de ALT, aspartato aminotransferasa (AST) e IL-1β. • Aumento de las fosforilaciones del AMPK y de los niveles de expresión nuclear del Nfr2, proteína que regula la expresión de genes que protegen a la célula contra el EO.	(Zhang et al., 2025)
Apigenina	• Disminución de TG, CT, ALT, AST y los niveles de IL-18 e IL-1β en ratones macho C57BL/6 alimentados con una dieta alta en grasas. • Reducción de la acumulación de lípidos hepáticos y de macrófagos. • Inhibición de la activación de la vía de señalización NLRP3/NF-κB	(Lu et al., 2023)
Quercetina	• Disminución de los niveles plasmáticos de ácidos grasos libres y de TG en ratones macho C57Bl/6J alimentados con una dieta alta en grasas. • Aumento del CT y disminución de la expresión de apoproteína B.	(Kuipers et al., 2018)
Rutina	• Disminución de los niveles de TG, CT, LDL y VLDL, y aumento del HDL en ratas Wistar de ambos sexos con hiperlipidemia inducida con Triton WR-1339. • Reducción del índice aterogénico	(NR et al., 2021)

5. Mecanismos de acción propuestos

Múltiples estudios preclínicos han demostrado que los compuestos fenólicos, como ácido clorogénico, ácido rosmarínico, catequina, escopoletina, apigenina, quercetina y rutina tienen el potencial de ejercer efectos benéficos en el metabolismo lipídico a través de la regulación de distintos mecanismos moleculares vinculados con la dislipidemia aterogénica, particularmente mediante la atenuación del estrés oxidativo y la respuesta inflamatoria (figura 2). Uno de los mecanismos más relevantes es la modulación de la actividad del NF-κB, que induce la expresión de genes que intervienen en la proliferación celular y la liberación de citocinas proinflamatorias que activan la respuesta inmune en macrófagos por medio de la disminución de la traslocación nuclear de la subunidad p65 (Pepe et al., 2018). El NF-κB juega un papel importante en la aterogénesis, al inhibir su translocación al núcleo celular se evita la disfunción endotelial, la producción de citocinas proinflamatorias y, por lo tanto, la formación de las lesiones ateroescleróticas (Li et al., 2022). Otro blanco terapéutico de los compuestos fenólicos de *H. patens* es el factor de transcripción Nfr2 (Factor Nuclear Eritroide 2 relacionado con el factor 2), proteína que controla la expresión de genes que codifican enzimas antioxidantes, como la NAD(P)H quinona oxidorreductasa-1 (NQO1) y la hemooxigenasa-1 (HO-1) (Pepe et al., 2018). Se ha demostrado que los polifenoles aumentan la expresión de estas dos últimas enzimas, contribuyendo a la mitigación del estrés oxidativo ocasionado por los ROS (Umar et al., 2023). Tal es el caso de polifenoles como el ácido clorogénico y el kaempferol, que han demostrado modular la vía Nrf2 y NF-κB en modelos experimentales. En estudios *in vitro*, el pretratamiento con ácido clorogénico incrementó de manera significativa la proteína Nrf2 en células sometidas a estrés oxidativo inducido por diquat (Chen et al., 2021). De forma semejante, el kaempferol aumentó la transactivación del Nrf2 en hepatocitos de la línea celular HepG2 (Zhao et al., 2023). A su vez, el pretratamiento con kaempferol redujo la activación de NF-κB y disminuyó la fosforilación de I-κB en un modelo murino de inflamación inducida por lipopolisacárido (LPS), respaldando su efecto antiinflamatorio (Bian et al., 2019). Aunque los efectos no han sido comprobados directamente de extractos o compuestos aislados de *H. patens*, la presencia de polifenoles como el kaempferol y él ácido clorogénico sugiere que su actividad biológica podría relacionarse con estas vías moleculares. Además, se ha documentado que los compuestos fenólicos aumentan la actividad de la carnitina palmitil transferasa (CPT), enzima esencial para la oxidación de ácidos grasos de cadena larga, y disminuyen la actividad de la hidroximetilglutaril coenzima A reductasa (HMG-CoAR) y la sintasa de ácidos grasos (SAG) (Bowman et al., 2024; Hussain et al., 2021). Estas dos últimas enzimas están implicadas en la biosíntesis del colesterol y en la síntesis *de novo* de ácidos grasos, enzimas que participan en la lipogénesis hepática y las reacciones lipolíticas (Bowman et al., 2024; Choi et al., 2025; Hussain et al., 2021).

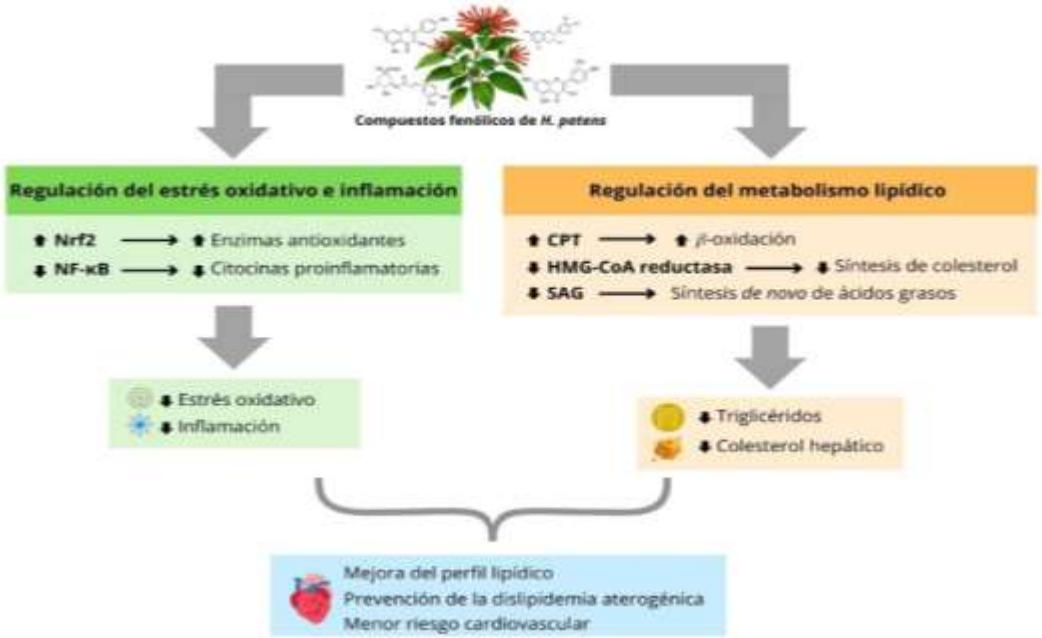


Figura 2. Mecanismos de prevención de dislipidemia propuestos.
Elaboración propia basada en estudios previos (Hussain et al., 2021; Li et al., 2022; Pepe et al., 2018).

6. Perspectivas futuras y desafíos

Los estudios revisados indican que los compuestos polifenólicos de *H. patens* poseen un potencial en la prevención del desarrollo de la dislipidemia aterogénica y sus complicaciones, gracias a su acción sobre múltiples blancos moleculares, principalmente en la modulación del estrés oxidativo y la respuesta inflamatoria. Permitiendo el desarrollo de estrategias terapéuticas naturales para la prevención y manejo de estas enfermedades. Sin embargo, la mayoría de los estudios preclínicos están enfocados en los compuestos aislados y no en el extracto completo de la planta, por lo que es necesario ampliar los estudios hacia la evaluación del extracto de *H. patens*, con el fin de observar si los efectos se atribuyen a un compuesto especifico o a una posible sinergia entre sus compuestos bioactivos. Asimismo, es necesario realizar estudios toxicológicos adicionales que evalúen la seguridad del consumo crónico de la infusión de *H. patens* en modelos animales, con el propósito de establecer dosis seguras para su posible aplicación terapéutica preventiva. Considerando lo anterior, es indispensable que futuras investigaciones se centren en la estandarización fitoquímica del extracto, permitiendo establecer una dosis con base a la concentración de los compuestos bioactivos de la planta. Además, gran parte de las investigaciones de dislipidemias se centran en modelos de ratas y ratones macho, existiendo una falta de diversidad biológica, que evidencien resultados representativos de una población general. Por lo tanto, es esencial la generación de investigaciones futuras donde se implementen modelos animales hembras y que se evalué la posible sinergia y toxicidad crónica del extracto y de los compuestos fenólicos de *H. patens* en la regulación del metabolismo lipídico, las citocinas proinflamatorias y de las enzimas hepáticas.

7. Conclusiones

La dislipidemia aterogénica es un trastorno lipídico que se relaciona con la resistencia a la insulina, la obesidad, la inflamación y el estrés oxidativo, que contribuyen al progreso de la aterogénesis. Los compuestos fenólicos de *H. patens* tienen el potencial de interactuar

en diversas rutas metabólicas y vías de señalización celular, representando una alternativa terapéutica en la prevención de la dislipidemia y sus complicaciones cardiovasculares al atenuar los procesos patológicos implicados en el desarrollo de este trastorno lipídico mediante la modulación del estrés oxidativo y la respuesta inflamatoria. Sin embargo, la falta de estudios con diversidad biológica y toxicidad crónica limita sus aplicaciones clínicas, por lo que es fundamental el desarrollo de investigaciones futuras con un enfoque más amplio.

8. Referencias

Bays, H. E., Kirkpatrick, C. F., Maki, K. C., Toth, P. P., Morgan, R. T., Tondt, J., Christensen, S. M., Dixon, D. L., & Jacobson, T. A. (2024). Obesity, dyslipidemia, and cardiovascular disease: A joint expert review from the Obesity Medicine Association and the National Lipid Association 2024. *Journal of Clinical Lipidology*, *18*(3), e320–e350. https://doi.org/10.1016/J.JACL.2024.04.001

Bereda, G. (2022). Pathophysiology and Management of Dyslipidaemia. *Biomedical Journal of Scientific y Technical Research*, *43*(2), 34369.

Blagov, A., Sobenin, I., Sukhorukov, V., Glanz, V., Pleshko, E., & Orekhov, A. (2024). Development of Dyslipidemia in Atherosclerosis and Modern Approaches to its Treatment. *The Heart Surgery Forum*, *27*(6), E680–E688. https://doi.org/10.59958/hsf.7341

Boarescu, P.-M., Boarescu, I., Pop, R. M., Roşian, Ş. H., Bocșan, I. C., Rus, V., Mada, R. O., Popa, I. D., Neagu, N., Bulboacă, A. E., Buzoianu, A. D., & Bolboacă, S. D. (2022). Evaluation of Oxidative Stress Biomarkers, Pro-Inflammatory Cytokines, and Histological Changes in Experimental Hypertension, Dyslipidemia, and Type 1 Diabetes Mellitus. *International Journal of Molecular Sciences*, *23*(3), 1438. https://doi.org/10.3390/ijms23031438

Bowman, T. K., Oweidat, A., Chehade, N. E. H., Cheriyan, M., Ayad, S., & Hoyt, M. (2024). Neuraxial labor analgesia in a parturient with carnitine palmitoyl transferase type II deficiency: a case report. *International Journal of Obstetric Anesthesia*, *60*, 104246. https://doi.org/10.1016/J.IJOA.2024.104246

Cho, Y., & Lee, S. Y. (2022). Useful Biomarkers of Metabolic Syndrome. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *19*(22), 15003. https://doi.org/10.3390/IJERPH192215003

Choi, W., Li, C., Chen, Y., Wang, Y. Q., & Cheng, Y. (2025). Structural dynamics of human fatty acid synthase in the condensing cycle. *Nature*, *641*, 529–536. https://doi.org/10.1038/S41586-025-08782-W

El-Sawi, S., Motawae, H., Kawy, M., Fekry, M., Youssef, H., Farghaly, A., & Maamoun, M. (2021). Novel anticancer drug delivery system based on zeolite encapsulating *Hamelia patens* leaf and flower extracts. *Indian Journal of Natural Products and Resources*, *12*(2), 181–194.

Fahed, G., Aoun, L., Zerdan, M. B., Allam, S., Zerdan, M. B., Bouferraa, Y., & Assi, H. I. (2022). Metabolic Syndrome: Updates on Pathophysiology and Management in 2021. *International Journal of Molecular Sciences*, *23*(2), 786. https://doi.org/10.3390/IJMS23020786

Feldman, F., Koudoufio, M., Desjardins, Y., Spahis, S., Delvin, E., & Levy, E. (2021). Efficacy of Polyphenols in the Management of Dyslipidemia: A Focus on Clinical Studies. *Nutrient*, *13*(2), 672. https://doi.org/10.3390/NU13020672

Forman, H. J., & Zhang, H. (2021). Targeting oxidative stress in disease: promise and limitations of antioxidant therapy. *Nature Reviews. Drug Discovery*, *20*(9), 709. https://doi.org/10.1038/S41573-021-00233-1

Gasmi, A., Mujawdiya, P. K., Noor, S., Lysiuk, R., Darmohray, R., Piscopo, S., Lenchyk, L., Antonyak, H., Dehtiarova, K., Shanaida, M., Polishchuk, A., Shanaida, V., Peana, M., & Bjørklund, G. (2022). Polyphenols in Metabolic Diseases. *Molecules*, *27*(19), 6280. https://doi.org/10.3390/MOLECULES27196280

Gutiérrez-Sánchez, M. del C., Aguilar-Zárate, P., Michel-Michel, M. R., Ascacio-Valdés, J. A., & Reyes-Munguía, A. (2022). The Ultrasound-Assisted Extraction of Polyphenols from Mexican Firecracker (*Hamelia patens* Jacq.): Evaluation of Bioactivities and Identification of Phytochemicals by HPLC-ESI-MS. *Molecules*, *27*(24), 8845. https://doi.org/10.3390/molecules27248845

Halli-Demeter, S., & Braun, L. T. (2022). Dyslipidemia. In *Lifestyle Nursing* (1st ed., pp. 253–267). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781003178330-21

Hu, Y., Chen, X., Hu, M., Zhang, D., Yuan, S., Li, P., & Feng, L. (2022). Medicinal and edible plants in the treatment of dyslipidemia: advances and prospects. *Chinese Medicine*, *17*(113), 1–28. https://doi.org/10.1186/S13020-022-00666-9

Hussain, A., Cho, J. S., Kim, J. S., & Lee, Y. I. (2021). Protective Effects of Polyphenol Enriched Complex Plants Extract on Metabolic Dysfunctions Associated with Obesity and Related Nonalcoholic Fatty Liver Diseases in High Fat Diet-Induced C57BL/6 Mice. *Molecules 2*, *26*(2), 302. https://doi.org/10.3390/MOLECULES26020302

Jacobsen, A. P., Whelton, S. P., Blumenthal, R. S., & Mcevoy, J. W. (2023). Dyslipidemia. In *Hypertension* (pp. 476–488). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88369-6.00042-6

Kaushik, C., & Singh, M. (2020). An updated phytopharmacological review on Hamelia patens Jacq. *International Journal of Pharmacognosy*, *7*(3), 52–61. https://doi.org/10.13040/IJPSR.0975-8232

Khatana, C., Saini, N. K., Chakrabarti, S., Saini, V., Sharma, A., Saini, R. V., & Saini, A. K. (2020). Mechanistic Insights into the Oxidized Low-Density Lipoprotein-Induced Atherosclerosis. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, *2020*(1), 5245308. https://doi.org/10.1155/2020/5245308

Kuipers, E. N., van Dam, A. D., Held, N. M., Mol, I. M., Houtkooper, R. H., Rensen, P. C. N., & Boon, M. R. (2018). Quercetin Lowers Plasma Triglycerides Accompanied by White Adipose Tissue Browning in Diet-Induced Obese Mice. *International Journal of Molecular Sciences*, *19*(6), 1786. https://doi.org/10.3390/IJMS19061786

Li, W., Jin, K., Luo, J., Xu, W., Wu, Y., Zhou, J., Wang, Y., Xu, R., Jiao, L., Wang, T.,

& Yang, G. (2022). NF-κB and its crosstalk with endoplasmic reticulum stress in atherosclerosis. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, *9*, 988266. https://doi.org/10.3389/FCVM.2022.988266

Lin, C.-H., Wu, J.-B., Jian, J.-Y., & Shih, C.-C. (2017). (−)-Epicatechin-3-O-β-D-allopyranoside from Davallia formosana prevents diabetes and dyslipidemia in streptozotocin-induced diabetic mice. *PLOS One*, *12*(3), e0173984. https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0173984

Llauradó-Maury, G., Méndez-Rodríguez, D., Hendrix, S., Escalona-Arranz, J. C., Fung-Boix, Y., Pacheco, A. O., García-Díaz, J., Morris-Quevedo, H. J., Ferrer-Dubois, A., Isaac-Aleman, E., Beenaerts, N., Méndez-Santos, I. E., Orberá-Ratón, T., Cos, P., & Cuypers, A. (2020). Antioxidants in Plants: A Valorization Potential Emphasizing the Need for the Conservation of Plant Biodiversity in Cuba. *Antioxidants*, *9*(11), 1048. https://doi.org/10.3390/ANTIOX9111048

López-Román, L., León-Lopez, A., & Olmedo-Angel, C. (2025). Tres hojitas (Hamelia Patens Jaq), más allá de la tradición. *Pardalis*, *1*, e0022. https://pardalis.uan.edu.mx/index.php/PARDALIS/article/view/22/15

Lorenzatti, A., & Toth, P. (2020). New perspectives on atherogenic dyslipidaemia and cardiovascular disease. *European Cardiology Review*, *15*(e04). https://doi.org/10.15420/ECR.2019.06

Lu, Z., Liu, L., Zhao, S., Zhao, J., Li, S., & Li, M. (2023). Apigenin attenuates atherosclerosis and non-alcoholic fatty liver disease through inhibition of NLRP3 inflammasome in mice. *Scientific Reports*, *13*, 7996. https://doi.org/10.1038/s41598-023-34654-2

Noor, G., Ahmad, Md. A., Ahsan, F., Mahmood, T., Arif, M., & Khushtar, M. (2020b). A Phytochemical and Ethnopharmacological Recapitulation on *Hamelia patens*. *Drug Research*, *70*(05), 188–198. https://doi.org/10.1055/a-1131-7856

NR, L. R., Nair, A. R., Senthilpandian, S., & Ravi, V. (2021). Hypolipidemic action of Rutin on Triton WR-1339 induced hyperlipidemia in rats. *Journal of Pre-Clinical and Clinical Research*, *15*(2), 51–55. https://doi.org/10.26444/JPCCR/136231

Nyandwi, J. B., Ko, Y. S., Jin, H., Yun, S. P., Park, S. W., & Kim, H. J. (2021). Rosmarinic acid exhibits a lipid-lowering effect by modulating the expression of reverse cholesterol transporters and lipid metabolism in high-fat diet-fed mice. *Biomolecules*, *11*(10), 1470. https://doi.org/10.3390/BIOM11101470

Pepe, G., Sommella, E., Cianciarulo, D., Ostacolo, C., Manfra, M., Di Sarno, V., Musella, S., Russo, M., Messore, A., Parrino, B., Bertamino, A., Autore, G., Marzocco, S., & Campiglia, P. (2018). Polyphenolic Extract from Tarocco (Citrus sinensis L. Osbeck) Clone "Lempso" Exerts Anti-Inflammatory and Antioxidant Effects via NF-kB and Nrf-2 Activation in Murine Macrophages. *Nutrients*, *10*(12), 1961. https://doi.org/10.3390/NU10121961

Purva, A., Gaur, K., & Khan, Mohd. S. (2020). A Review on Dyslipidemia: Types, Risk Factors and Management. *Asian Journal of Pharmaceutical*

Research and Development, *8*(2), 96–98. https://doi.org/10.22270/ajprd.v8i2.682

Rojas-Martínez, R., Aguilar-Salinas, C. A., Romero-Martínez, M., Castro-Porras, L., Gómez-Velasco, D., & Mehta, R. (2021). Trends in the prevalence of metabolic syndrome and its components in Mexican adults, 2006-2018. *Salud Pública de México*, *63*(6), 713–724. https://doi.org/10.21149/12835

Scavuzzi, B. M., & Dichi, I. (2025). Effects of a Diet Rich in Polyphenols on Lipid Metabolism: An Updated Narrative Review. *Heart and Mind*, *9*(3), 264–276. https://doi.org/10.4103/hm.HM-D-24-00106

Thongtang, N., Sukmawan, R., Llanes, E. J. B., & Lee, Z.-V. (2022). Dyslipidemia management for primary prevention of cardiovascular events: Best in-clinic practices. *Preventive Medicine Reports*, *27*, 101819. https://doi.org/10.1016/J.PMEDR.2022.101819

Umar, U., Ahmed, S., Iftikhar, A., Iftikhar, M., Majeed, W., Liaqat, A., Shahzad, S., Abbas, M., Mehmood, T., & Anwar, F. (2023). Phenolics Extracted from Jasminum sambac Mitigates Diabetic Cardiomyopathy by Modulating Oxidative Stress, Apoptotic Mediators and the Nfr-2/HO-1 Pathway in Alloxan-Induced Diabetic Rats. *Molecules*, *28*(14), 5453. https://doi.org/10.3390/MOLECULES28145453

Valle-Ortiz, D. J., Aguila-Muñoz, D. G., Cruz-López, M. del C., Cortés-Espinosa, D. V., Rosales-Castro, M., & Jiménez-Montejo, F. E. (2025). Comparison of Secondary Metabolite Extraction Methods in Hamelia patens Jacq. and Their Inhibitory Effect on Fusarium oxysporum f. sp. radicis-lycopersici. *Metabolites*, *15*(1), 23. https://doi.org/10.3390/METABO15010023

Yanai, H., & Yoshida, H. (2021). Secondary dyslipidemia: its treatments and association with atherosclerosis. *Global Health & Medicine*, *3*(1), 15–23. https://doi.org/10.35772/ghm.2020.01078

Ye, X., Li, J., Gao, Z., Wang, D., Wang, H., & Wu, J. (2022). Chlorogenic Acid Inhibits Lipid Deposition by Regulating the Enterohepatic FXR-FGF15 Pathway. *BioMed Research International*, *2022*(1), 4919153. https://doi.org/10.1155/2022/4919153

Zhang, J., Yuan, Y., Gao, X., Li, H., Yuan, F., Wu, D., Cui, Q., Piao, G., & Yuan, H. (2025). Scopoletin ameliorates hyperlipidemia and hepatic steatosis via AMPK, Nrf2/HO-1 and NF-κB signaling pathways. *Biochemical Pharmacology*, *231*, 116639. https://doi.org/10.1016/J.BCP.2024.116639

Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Entre cielo, mar y tierra: la duna costera en el Caribe mexicano

"Between Sky, Sea, and Land: The Coastal Dune in the Mexican Caribbean"

Gayosso-Soto, E.[1], Cohuo, S.[1]*, Tello-Chan, J.M.[2], Hernández-Hernández, P.[1], Huix, C.M.[1]

[1] Tecnológico Nacional de México/IT de Chetumal, Av. Insurgentes 330, Chetumal 77013, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9836-9110, https://orcid.org/0000-0002-7826-5303*, https://orcid.org/0009-0000-9625-5355, https://orcid.org/0000-0002-5081-2424.

[2] Tecnológico Nacional de México/IT de Cancún, Av. Rodrigo Gómez (Kabah) Km. 3, Centro, Cancún 77515, México. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-9619-7264.

d02390194@chetumal.tecnm.mx; sergio.cd@chetumal.tecnm.mx*; jorge.tc@chetumal.tecnm.mx d12390410@chetumal.tecnm.mx; d12390746@chetumal.tecnm.mx

Innovación Tecnológica: Reconocimiento, monitoreo y evaluación del sistema de duna costera mediante el uso de drones con sensor LiDAR en el Caribe mexicano (CM).

Área de aplicación industrial: Conservación y manejo de ecosistemas con aplicaciones en el sector turismo y desarrollo costero.

Recibido: 30 noviembre 2025
Aceptado: 19 mayo 2026

Abstract

The coastal dune (CD) is a natural sand formation that extends along seas and oceans, generally aligned parallel to the shoreline. Its height can range from a few centimeters to up to 130 meters, forming continuous or interrupted sand ridges that may extend several kilometers inland. The development, morphology, and stabilization of the dune system are determined by wind direction and velocity, sand availability, and the amount and type of vegetation present. The topographic profile of the dune system is composed of an embryonic dune, a primary foredune, and secondary and tertiary foredunes. Its structure and species composition vary from areas near the sea to more protected inland zones, where the accumulation of organic matter, water availability, pH, and salt spray become more stable. The vegetation types and species composition in tropical, subtropical, and temperate regions are typically diverse. Overall, dunes and their associated vegetation provide coastal protection against the erosive effects of storms and hurricanes, reducing impacts by approximately 36% and 64%, respectively. In addition, they provide food and shelter for a wide range of coastal fauna.

In the Mexican Caribbean (MC), a frontal dune ecosystem develops as a sand ridge extending along the coastline, either continuously or discontinuously, with variable width and elevations ranging from 5 m to over 12 m. Approximately 3% of this ecosystem is located in the southern portion of the MC, where the present study area is situated, between El Placer and Pulticub. This study aims to demonstrate the effectiveness of aerial photogrammetry integrated with LiDAR sensors for the rapid and efficient monitoring and analysis of coastal environments. The evaluated area is characterized by a relatively narrow beach associated with an immediate frontal dune exhibiting a gentle slope (0.5 m to 1 m). Its topographic profile lacks clearly distinguishable embryonic and primary dunes. Creeping herbaceous vegetation develops in areas close to the shoreline, extending across the beach and dune slope, transitioning into shrub–herbaceous vegetation from the crest up to approximately 85 m inland, adjacent to the coastal road. The floristic community is in a good state of conservation, with substantial vegetation cover and plant heights ranging from 3 m to 13 m. The establishment of sampling sites, combined with the use of drones and LiDAR sensors for the characterization and analysis of coastal dunes and their associated vegetation, proved to be an efficient technological approach. The implementation of these technologies can support improved decision-making and the development of conservation and monitoring strategies for coastal ecosystems.

Keywords: Coastal dune, Topographic profile, Vegetation, Mexican Caribbean.

Resumen

La duna costera (DC), es una formación natural de arena que se extiende a lo largo de los mares y océanos alineada generalmente paralelo a la costa. Pueden medir desde unos centímetros hasta 130 metros de altura, formando cordones de arena continuos o interrumpidos, llegando a extenderse varios kilómetros tierra adentro. El desarrollo, forma y estabilización de la DC está determinado por la dirección y velocidad del viento, la disponibilidad de arena y la cantidad y tipo de vegetación presente. El perfil topográfico del sistema dunar está constituido por una duna embrionaria, una duna frontal primaria y dunas frontales secundarias y terciarias. Su estructura y composición de especies es variable desde zonas próximas al mar a zonas internas más protegidas dónde la acumulación de materia orgánica, agua, pH y aspersión salina es más estable. El tipo de vegetación por especies en las zonas tropical, subtropical o templada suele ser diversa. En conjunto duna y vegetación protegen a la zona costera contra el efecto erosivo de tormentas y huracanes entre un 36% y 64%, respectivamente. Además, brindan alimento y refugio a una gran cantidad de fauna costera. En el Caribe mexicano (CM), se desarrolla un ecosistema de duna tipo frontal, como cordón de arena acumulada que corre a lo largo de la costa, de forma continua y/o discontinua; con variada amplitud, alcanzando alturas entre 5 m y > 12 m. En la porción sur del CM se encuentra el 3% de este ecosistema, en esta región se concentra el área de estudio, comprendida entre el Placer y Pulticub. Este estudio tiene como objetivo demostrar la efectividad de la fotogrametría aérea integrada con sensores LiDAR para el monitoreo y análisis rápido y eficiente de los ambientes costeros. El área evaluada, presentó una playa poco extensa asociada a una duna frontal inmediata con pendiente suave y poco pronunciada (0.5 m a 1 m). Su perfil topográfico carece de duna

embrionaria y de duna primaria identificables. La vegetación herbácea-rastrera inicia su desarrollo en zonas cercanas al mar sobre la playa y pendiente de duna, cambiando a vegetación arbustiva-herbácea a partir de la cresta hasta ~85 m colindante con el camino costero. La comunidad florística se encuentra en buen estado de conservación con cobertura relevante, presentando alturas entre 3 m y 13 m, respectivamente. El establecimiento de sitios de muestreo combinado con el uso de drones y sensor LiDAR para la caracterización y análisis de la duna costera y su vegetación asociada resultaron ser herramientas tecnológicas eficientes. La implementación de esta tecnología puede ayudar a tener un mejor panorama en la toma decisiones y en la generación de estrategias de conservación y monitoreo de los ecosistemas costeros.

Palabras clave: duna costera, perfil topográfico, vegetación, Caribe mexicano.

1. Introducción

La duna costera (DC) de tipo frontal es una formación natural de arena que se extiende a lo largo de los mares y océanos alineada generalmente paralela a la costa. Se forma con el paso del tiempo a través de la acción del viento que transporta y acumula arena en zonas costeras [1-2]. Pueden medir desde unos centímetros hasta 130 metros de altura, formando cordones de arena continuos o interrumpidos, que llegan a extenderse varios kilómetros tierra adentro y a lo largo del litoral costero [2-3]. Los diferentes tipos de dunas se clasifican en base en su morfología y dinámica eólica en barjanes, barjanoides, transversales, longitudinales, parabólicas y en estrella [4]. Algunas de las cuales pueden presentar vegetación costera [3-5]. Ley-Vega de Seoane et al. [6], clasifica las dunas frontales en embrionarias, primarias, secundarias y terciarias. Hesp [7], señala que las dunas frontales se forman a partir de dunas incipientes y se distinguen por el desarrollo de especies vegetales intermedias de composición y estructura leñosa (árboles y arbustos). Las dunas costeras no siempre mantienen la misma forma y estructura. Las dunas nacientes se conocen como primarias, porque intercambian activamente sedimentos con la playa. Las dunas secundarias, son generalmente dunas primarias antiguas que ya no forman parte de la zona litoral debido a que han ganado terreno al mar por acumulación excesiva de arena (sedimento). Las dunas terciarias son acumulaciones de arenas que se ubican en la zona más protegida del perfil de la duna, alejada de los factores extremos del mar; aquí la estructura y composición de especies es distinta con mayor cobertura vegetal, además la concentración de materia orgánica es más abundante [8].

Las dunas pueden moverse por la dirección, fuerza e intensidad del viento, por las mareas y oleaje y pueden clasificarse como móviles aquellas dunas que se ven afectadas por el intemperismo y factores ambientales, cambiando de forma y posición constantemente; dunas semimóviles que son dunas más estables que por lo general mantienen cierta vegetación, pero que no dejan de estar expuestas a los factores climáticos y pueden cambiar en un gradiente de altura y extensión; y las dunas estabilizadas, que mantienen vegetación, encontrándose bien definida la altura y extensión y que a diferencia de las anteriores, los factores ambientales no llegan a afectarle considerablemente [2, 5, 9].

Las DC´s son importantes porque proveen servicios ecosistémicos a las personas. Cuando ocurren fenómenos naturales como huracanes, tormentas y oleaje, estos actúan como un escudo natural, que protege playas y

comunidades costeras [9]. También son el hábitat de innumerables especies de plantas y animales. Hay fauna endémica que solo vive en este tipo de ecosistema, por ejemplo, muchos crustáceos, anfípodos o talitridos conocidos como isópodos (*Ligia spp*.), arácnidos, tardígrados y plantas halófitas que se han adaptado a las condiciones extremas (alta salinidad y temperaturas elevadas) de la duna [10-12]. Las aves marinas, son visitantes frecuentes de las dunas, ya que las utilizan para comer, reproducirse, descansar o anidar, ejemplo de ello son el chorlitejo patinegro (*Charadrius alexandrinus*), chorlito nevado (*Charadrius nivosus*), gaviota reidora (*Leucophaeus atricilla*) y la golondrina marina común (*Sterna hirundo*) [10]. Otras especies como las tortugas, depende de ellas para anidar, como la tortuga blanca o verde (*Chelonia mydas*), la tortuga caguama (*Caretta caretta*), la tortuga carey (*Eretmochelys imbricata*) y la tortuga laúd (*Dermochelys coriacea*) [10, 13, 14]. Algunas especies de lagartijas como la lagartija de arena de Cozumel (*Aspidoscelis cozumela*) y el gecko de las dunas (*Phyllodactylus tuberculosus*), así como muchos crustáceos como el cangrejo fantasma (*Ocypode quadrata*), cangrejo ermitaño (*Coenobita clypeatus*) [10, 15-17]. También podemos encontrar una gran variedad de pequeños mamíferos como el murciélago pescador mayor (*Noctilio leporinus*) y roedores como el ratón de arena de Yucatán (*Peromyscus yucatanicus*) o el ratón de Cozumel (*Peromyscus cozumelae*) que interactúan dentro de esto ecosistemas y pasan una parte significativa de su ciclo de vida [18]. Otras especies de mayor tamaño, como los jaguares (*Panthera onca*) y los tapires (*Tapirus bairdii*) utilizan estas zonas para alimentarse [19]. Incluso en los diminutos espacios entre los granos de arena (intersticios) que parecieran inhabitables por su pequeño tamaño, prosperan bacterias, hongos, nemátodos y pequeños artrópodos (insectos principalmente) [10,11,20].

2. Vegetación asociada al perfil de la duna costera

La vegetación es un elemento muy importante en la duna costera, porque ramas y raíces atrapan y fijan la arena, evitando que el viento y el oleaje la erosionen, y proporcionan refugios y zonas de alimentación, a múltiples especies de animales dando lugar a la aparición de relaciones alimentarias entre los organismos de este sistema natural costero [2,5,9]. A la vegetación de la duna costera se le conoce como halófita, ya que puede soportar altos niveles de salinidad provenientes de su cercanía e interacción con el mar. Contribuye a la protección del litoral, evitando el embate de las olas, reduciendo el efecto erosivo de tormentas y huracanes entre un 36% y 64%, respectivamente, siendo esto de gran importancia en una región en donde cada año se presentan las amenazas por estos fenómenos hidrometeorológicos [22,23]. Además, la vegetación en este ecosistema puede atrapar contaminantes ambientales, como el dióxido de carbono proveniente de la quema de combustibles y eliminar compuestos de las aguas residuales, evitando que éstos lleguen al mar [9, 21].

La comunidad florística de la duna costera se estudia desde aquella que se establece más próxima al mar, hacia tierra dentro [5]. Una característica importante de la vegetación es que varía su arreglo y composición a medida que se aleja del mar. También puede modificarse por su posición latitudinal: como en las zonas tropicales, subtropicales o templada y su capacidad de tolerar las condiciones de cada zona [24,25]. La vegetación contribuye en menor medida a la morfología de la duna, a medida que se extienden las raíces y ramas, sin embargo, el factor más determinante es la dirección del viento, cantidad y acumulación de arena [9]. Generalmente, el arreglo florístico en la duna

embrionaria y primaria inicia con especies pioneras nativas de herbáceas y rastreras escasas [7, 26, 27]. Estas especies colonizadoras crecen después de la línea alcanzada por las olas y son las primeras en abrir camino para que, con el tiempo, otras plantas logren instalarse [2, 4, 9]. En muchas regiones turísticas, este tipo de especies son remplazadas por especies ornamentales no nativas, exóticas o introducidas, que buscan embellecer el paisaje, como la lechuga de mar (*Scaevola taccada*), sin embargo, la sustitución de estas especies rompe con el equilibrio natural y puede causar modificaciones o incluso eliminación de dunas costeras en desarrollo [9, 28].

En las dunas secundarias y terciarias, existe un mosaico de especies de flora de tipo arbustivo y arbóreo tierra adentro, debido a que la duna es más estable, por acumulación de arena y materia orgánica (Figura 1) [24,26,27]. En esta zona pueden encontrarse plantas y árboles que suelen encontrarse más allá de las costas, característicos de selvas tropicales, incluyendo especies de manglares, palmas y plantas epífitas como bromelias y orquídeas (Figura 1) [5,7, 9, 24, 26, 27].

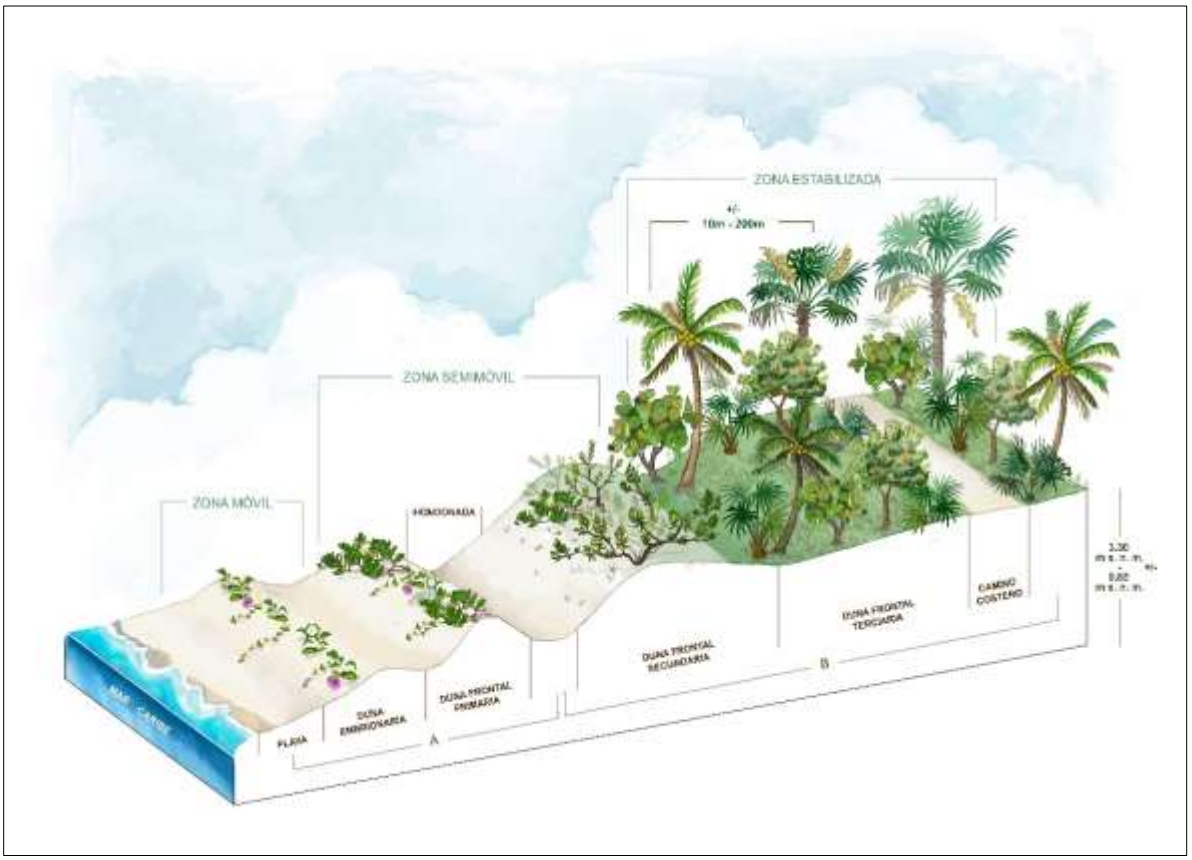


Figura 1. Esquema del perfil topográfico de un sistema de duna frontal en el Caribe mexicano, de acuerdo con criterio topográfico (playa, duna embrionaria, duna frontal primaria, hondonada, duna frontal secundaria y duna frontal terciaria) y de vegetación (zona móvil, zona semimóvil, zona estabilizada). A) Indica la vegetación pionera (herbácea-rastrera); B) Indica la vegetación de matorral (arbustivo-herbáceo y arbustivo-arbóreo; ilustración de Flores-Flores, R).

En México y la Península de Yucatán (PY), podemos encontrar distintas composiciones vegetales asociadas a la duna costera, debido que las condiciones climáticas son muy variadas, desde un clima árido en el norte a más húmedo y tropical en el sur. Por su

posición geográfica la PY se encuentra influenciada por el Golfo de México (Océano Atlántico) y las cálidas aguas del mar Caribe, caracterizados por distintas condiciones ambientales. Por lo cual, la composición de especies vegetales es muy variada e importante, lo que da lugar a ecosistemas únicos que vale la pena estudiar [5, 29].

3. Duna costera en el Caribe mexicano

El tipo de duna que se desarrolla en la PY en la porción oeste, que colinda con el mar Caribe (Caribe mexicano) es de tipo frontal. Está formada por un cordón de arena acumulada que es arrastrada por el viento y que corre a lo largo de la costa, de forma continua y/o discontinua; e inicia cercano al mar hacia tierra adentro con variada amplitud, alcanzando alturas de hasta 5m, aunque dadas las condiciones y en zonas específicas, puede alcanzar >12m [30,31]. El Caribe mexicano ha sido dividido en tres zonas (norte, centro y sur) y señalan que la superficie de dunas costeras es desigual entre ellas [32, 33]. De un total de 5128 hectáreas de dunas costeras, el 91% (4666.4 8 hectáreas) se concentra en la zona norte, entre las ciudades de Tulum y Cancún. El 6% (307.68 hectáreas) se localiza en la zona centro dentro del polígono que delimita la Reserva de la Biosfera de Sian Ka´an (RBSK) y el 3% (153.84 hectáreas) restante se distribuye desde el límite sur de la RBSK hasta la comunidad de Xcalak [32]. En el Caribe mexicano los ecosistemas adyacentes como corales duros, pastos marinos, praderas de algas, y sus características biofísicas como composición, complejidad geomorfológica, profundidad, distancia del litoral, influyen en la forma de la duna y su cobertura vegetal [30,34]. Ambientes con pasto marino y laguna arrecifal poca profunda (<2 metros), con amplitud de ~1000 metros a partir de la costa, presentarán dunas menores a dos metros de altura y una playa-duna angosta (20 metros), pero, zonas con profundidades mayores a dos metros y a más de 1000 metros de la costa permiten el paso de olas más intensas al litoral generado una playa-duna más amplia (~30-40 metros), con dunas de pendiente pronunciada (>4 metros), con un dinamismo más activo entre playa-duna y la zona marina adyacente, que permite la formación y consolidación de la duna frontal costera [30].

Dentro de las especies vegetales para el Caribe mexicano podemos encontrar plantas típicas de Yucatán, con especies de hábitats más secos y caracterizados por el endemismo como ch'iin took' o puut mukuy (maya) (*Enriquebeltrania crenatifolia)*, henequén de playa (*Agave angustifolia*) y halófitas como juluub (maya) (*Bravaisia berlandieriana*), ya'ax k'aax (maya) (*Pithecellobium keyense*) y quelite salado (*Suaeda linearis*); y las plantas típicas de Quintana Roo, con comunidades típicamente caribeñas, con ocotillo (*Erithalis fruticosa*), uva de mar o ni'che' (maya) (*Coccoloba uvifera*), enredadera de haya (*Ernodea littoralis*), y Palma de Guinea (español) o kuka' o ya'ax jalalche' (maya) (*Pseudophoenix sargentii*) y la palma chit (*Thrinax radiata*) [5, 29, 31, 35, 36, 37]. Es importante señalar que las especies vegetales descritas, en muchos casos, no son exclusivas de las dunas costeras, sin embargo, son especies que se han adaptado al medio hóstil que ofrece la duna [2, 5, 9, 24, 30]. A su vez, son las encargadas de mantener la estabilidad de la duna, por lo que es de importancia reconocer cuáles son estas especies vegetales que pueden sobrevivir en estas zonas, su endemismo, si es el caso y su protección para evitar la erosión de la propia duna. Las dunas costeras y su vegetación son afectadas por la acción humana en todas las latitudes del mundo y las costas de México no son ajenas a este problema [38, 39]. En el Caribe mexicano, actividades turísticas como el turismo recreativo, el establecimiento de tiendas, restaurantes, carreteras y otra infraestructura que no contemplan la

geomorfología de las dunas, las afectan severamente, pudiendo incluso eliminarlas [32, 39]. En este contexto, reconocer la importancia de estas especies vegetales y promover su conservación resulta clave para garantizar la protección de las dunas y su función como barrera natural frente a la erosión costera.

4. Caso de estudio: Zona costera en el sur de Quintana Roo

El área de estudio se encuentra en la zona sur del CM entre el Placer y Pulticub, colindando con la RBSK en su porción sur (Figura 2a-2c). Mediante la combinación de dos enfoques metodológicos: 1. recorridos y muestreo de campo, a través del establecimiento de cuatro sitios de muestreo distribuidos tanto dentro como fuera de la superficie sobrevolada (1.347 ha), y 2. fotogrametría aérea con sensor LiDAR, se describió el perfil de la duna y se caracterizó la composición de especies en la duna frontal costera del área evaluada. Además, se empleó un sistema de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS: *Remotely Piloted Aircraft,* por sus siglas en inglés), modelo DJI Matrice 350, en conjunto con una estación móvil D-RTK2, utilizando cuatro puntos de control terrestre. El sistema integró un sensor Zenmuse L2 con tecnología LiDAR, con precisión vertical y horizontal de 4 cm y 5 cm, respectivamente, así como capacidad de hasta cinco retornos, lo que permite una alta eficiencia y penetración en la vegetación (https://enterprise.dji.com/es/zenmuse-l2).

Con este sistema se escaneó una superficie aproximada de 1.347 ha (Figura 2c), a partir de la cual se generó un ortomosaico 2D y una nube de puntos densa utilizando el software especializado DJI Terra (Figuras 3a-3b). Este estudio tiene como objetivo demostrar la efectividad de la fotogrametría aérea integrada con sensores LiDAR para el monitoreo y análisis rápido y eficiente de los ambientes costeros. De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México (INEGI), en su capa vectorial sobre el tipo de vegetación y el uso del suelo, en esta zona se desarrolla un tipo de vegetación de duna costera (Figura 2b).

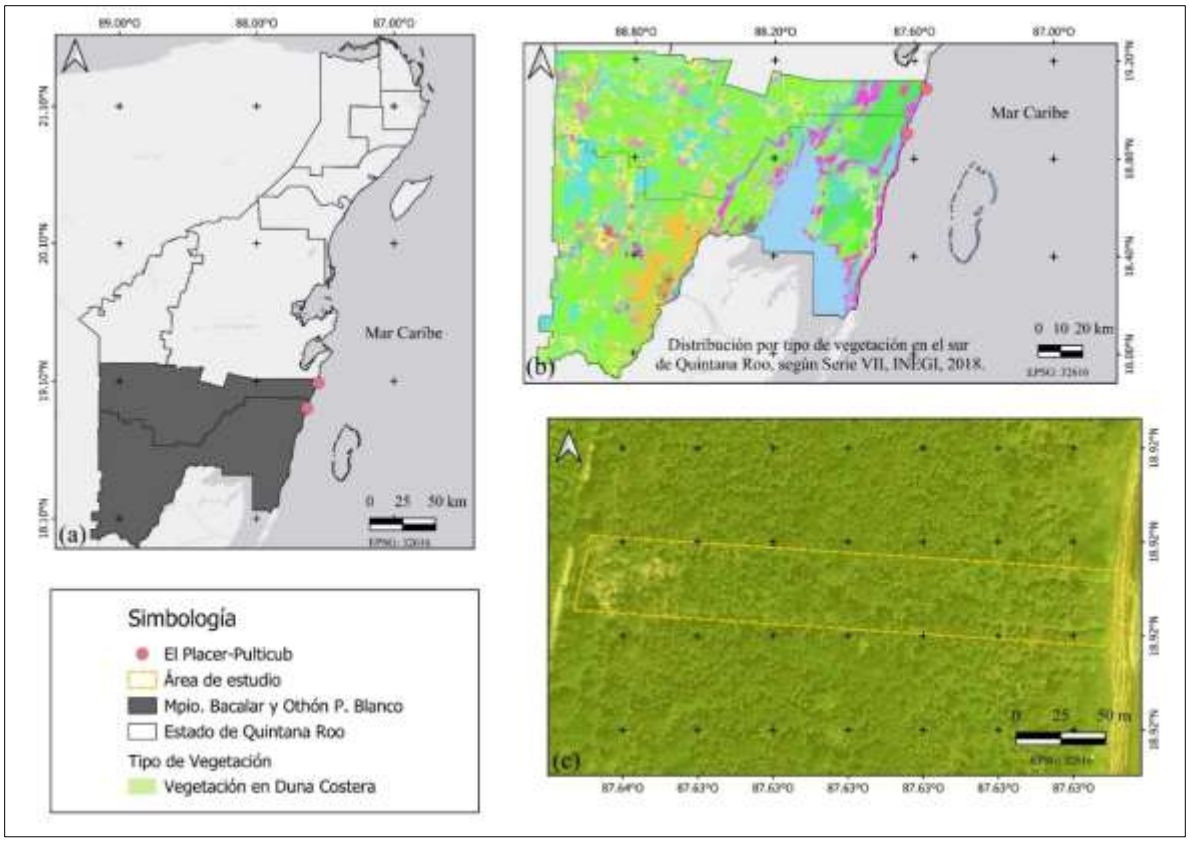


Figura 2. Ubicación geográfica del proyecto en la zona costera del municipio de Bacalar y Othón P. Blanco, estado de Quintana Roo (2a). Zona donde se distribuyen diferentes tipos de vegetación, según serie VII del INEGI (2b), incluida la vegetación del predio (2c). Se puede acceder a los datos del tipo de vegetación en: https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463842781.

La zona evaluada exhibió una playa poco extensa asociada a una duna frontal inmediata con pendiente suave y poco pronunciada (0.5m a 1m) pero que se distinguía a simple vista como una elevación del terreno. Es decir, su perfil topográfico carece de duna embrionaria y primaria identificable en campo como se muestra en la Figura 1. Los resultados obtenidos con la tecnología propuesta ayudo a identificar una vegetación en duna costera y una duna frontal similares a lo reportado por Gayosso-Soto [35] y Elizondo et al. [36], para las dunas costeras de la zona sur de la RBSK, las cuáles exhiben amplitud variable con pendiente poco pronunciada o incipiente, siendo en algunas zonas apenas perceptible en campo o ausentes.

En esta área la duna frontal secundaria costera se encuentra paralela a la costa y se prolonga tierra adentro desde su cara posterior hasta el camino costero adyacente, estabilizando la zona mediante una duna terciaria (Figura 4). Aquí, el tipo de vegetación herbácea-rastrera inicia su desarrollo en zonas cercanas al mar sobre la playa y pendiente de duna (Figura 5a), cambiando a vegetación arbustiva-herbácea a partir de la cresta hasta ~85m dentro de la zona estudiada (Figura 5b-c). Además, de observarse dentro de esta área hasta el camino costero adyacente una vegetación arbórea-arbustiva con parches herbáceos (Figura 5d), características que coinciden con algunas zonas de la porción sur de la RBSK [35, 36].

La composición y estructura de la vegetación estuvo conformada por 12 especies distribuidas en 10 familias, siendo Arecaceae y Sapotaceae las más representativas con 2 especies, respectivamente; y está compuesta por; chunup (*Scaevola plumieri),* riñonina *(Ipomoea pes-capre),* palma chit *(Thrinax radiata),* akitz *(Cascabela gaumeri),* palma de coco *(Cocos nucifera),* kaniste *(Pouteria campechiana),* chechem *(Metopium brownei),* zapote *(Manilkara zapota),* sikmay *(Tournefortia gnaphalodes)*, yaxnic (*Vitex gaumeri*), higuerilla (*Ficus obtusifolia*) y chaca (*Bursera simaruba*). Santiago-Contreras et al. [40] encontraron 10 especies en la región comprendida entre Mahahual-Xcalak al sur del Caribe mexicano, similar a lo obtenido en este estudio. A pesar de observarse la presencia de infraestructura turística que ha modificado el paisaje costero, se observó que la comunidad florística se encuentra en buen estado de conservación y presentó alturas que oscilaron entre 3 m y 13 m, respectivamente. La palma chit (*Thrinax radiata*), fue la única especie en categoría de riesgo según la NOM-059-SEMARNAT-2010 [41].

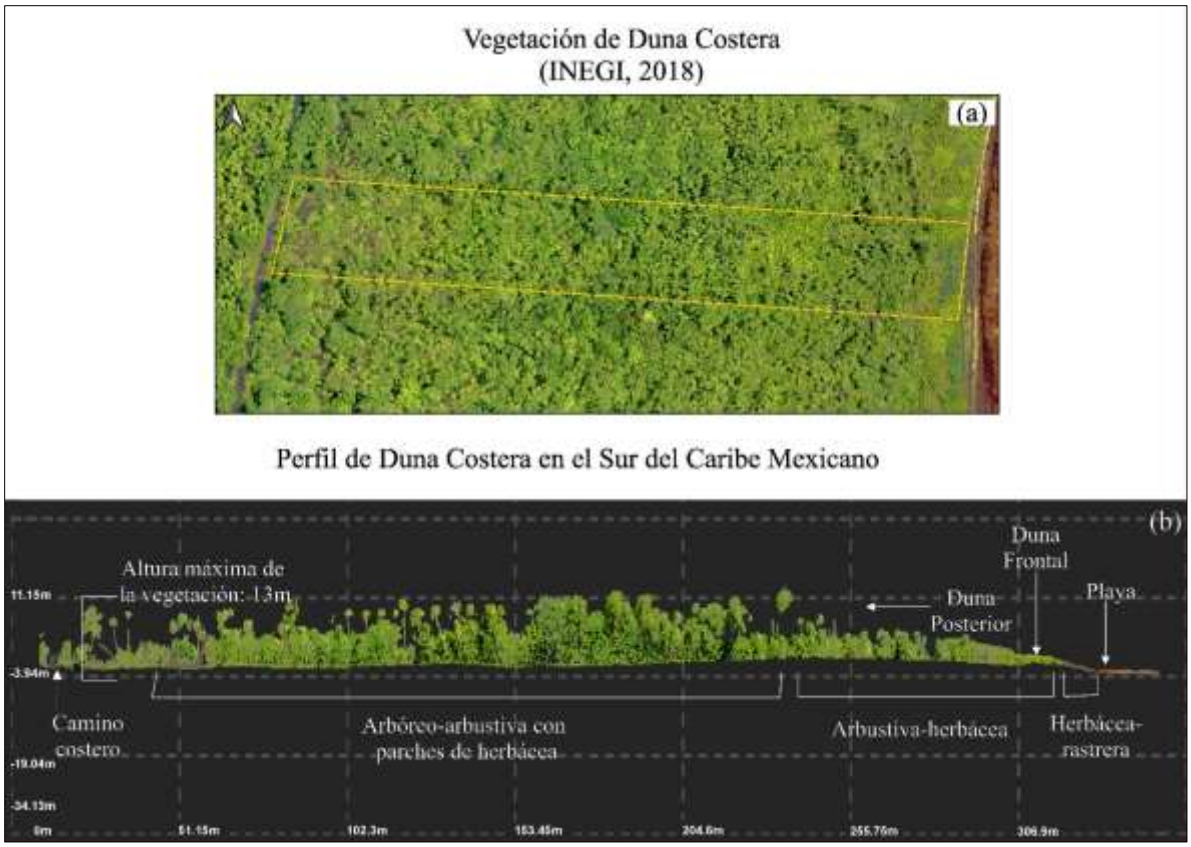


Figura 3. Representación del área de estudio exhibiendo el tipo de vegetación que se desarrolla en la duna costera (a), y esquematización mediante nubes de punto LiDAR del perfil de la duna costera que exhibe la zona sur del Caribe mexicano entre el Placer y Pulticub (Quintana Roo) (b).

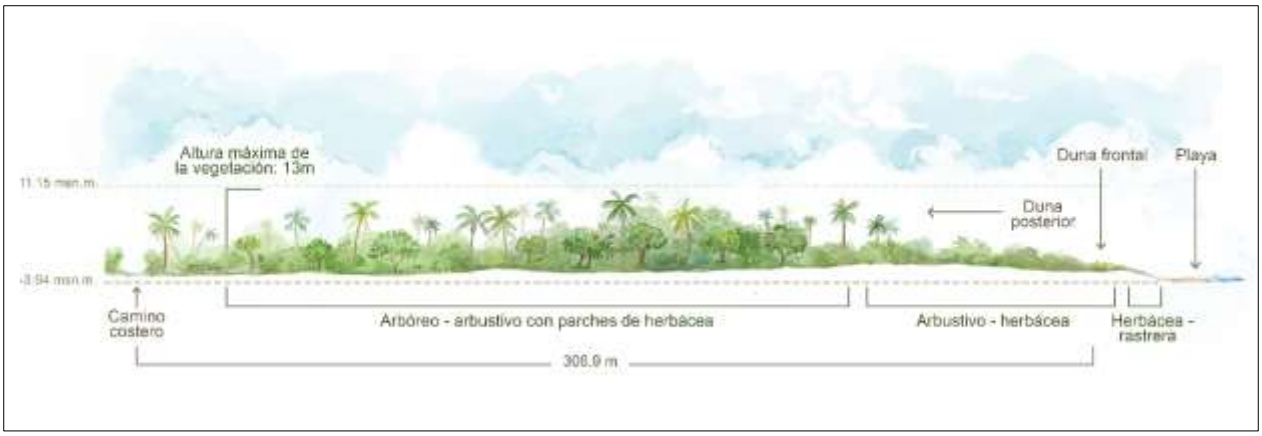


Figura 4. Esquematización general del perfil y gradiente ecológico que exhibe la duna costera en el sur del Caribe mexicano (ilustración de Flores-Flores, R.).

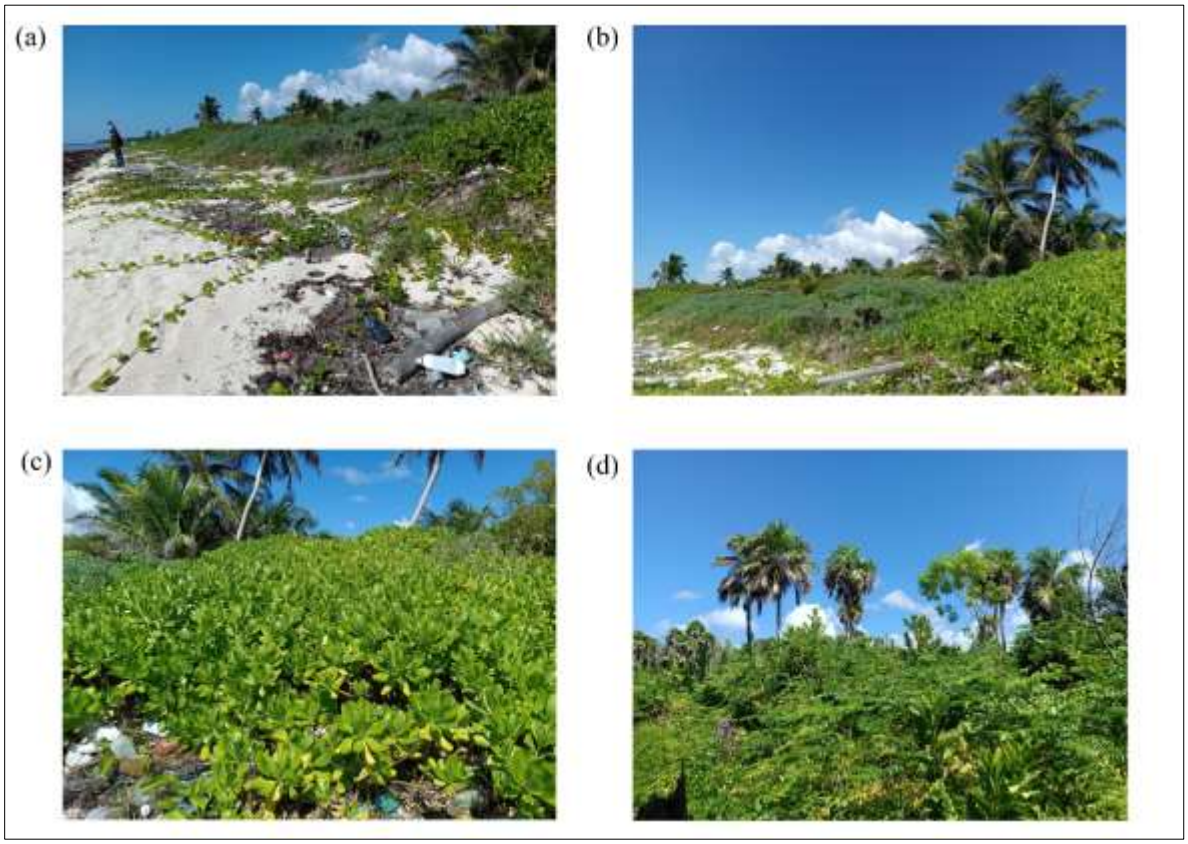


Figura 5. Vegetación herbácea-rastrera (a), arbustivo-herbácea (b-c) y arbórea-arbustiva con parches de herbácea (d) en el área de estudio (fotos: Estrella-Cach, J. A.).

Por otra parte, Gayosso-Soto [35], Collantes-Chávez-Costa et al. [42] y Gutiérrez-Báez et al. [43] encontraron 32, 37 y 36 especies de flora en la duna costera de la RBSK y en Cozumel. De acuerdo a estos autores algunas de las especies que han sido registradas en el CM son frijol de playa (*Canavalia rosea*), riñonina (*Ipomoea pes-caprae*), campanita de playa (*Ipomoea imperati*), verdolaga de playa (*Sesuvium portulacastrum*), ch'ilibil su'uk (*Sporobolus virginicus*), margarita de mar (*Ambrosia hispida*), Pats'il (*Suriana*

marítima), Sikmay (*Tournefortia gnaphalodes*), ernodea de playa (*Ernodea littoralis*), icaco (*Chrysobalanus icaco*), palma chit (*Thrinax radiata*), chechem (*Metopium brownei*), uva de mar (*Coccoloba uvifera*), chunup (*Scaevola plumieri*), siricote de playa (*Cordia sebestena*), orégano silvestre (*Lantana involucrata*), zacate salado (*Distichlis spicata*), ya'ax su'uk (*Eragostris prolifera*) entre otras; algunas especies coinciden con las observadas en este trabajo (Figura 5).

5. Conclusión

Las dunas costeras son mucho más que espacios o montículos de arena a la orilla del mar. Constituyen ecosistemas complejos, dinámicos y frágiles que albergan una riqueza natural sorprendente: desde diminutos organismos que viven entre los granos de arena, hasta aves marinas, tortugas y mamíferos que dependen de ellas para sobrevivir. La vegetación cumple un papel central en su formación y estabilidad, con especies pioneras que inician el proceso en las dunas embrionarias y con comunidades más densas que consolidan las dunas secundarias y terciarias tierra adentro. Por sus particularidades, las dunas presentan comunidades vegetales bien diferenciadas de otros ecosistemas, por lo que es necesario su estudio individual para comprender sus procesos, y su interacción con otras zonas naturales, como las selvas, o inclusive los sistemas arrecifales. Sin embargo, la presión humana, especialmente el turismo y el desarrollo urbano en las zonas costeras amenaza su equilibrio. La sustitución de especies nativas por plantas ornamentales, la construcción de infraestructura y el crecimiento de poblaciones en estas áreas transforman profundamente su estructura y ponen en riesgo los servicios ambientales que nos brindan. Conservar y estudiar las dunas es, por lo tanto, una tarea urgente. Comprender su perfil florístico y los procesos que las sostienen nos permite no solo valorar su extraordinaria riqueza ecológica, sino también reconocer el papel vital que cumplen en nuestra propia seguridad y bienestar. Su estudio y preservación es una inversión para el futuro de nuestras costas y playas caribeñas. Por último, el establecimiento de sitios de muestreo combinado con el uso de drones y sensor LiDAR para la caracterización y análisis de la duna costera y su vegetación asociada resultaron ser herramientas eficientes para el estudio del paisaje costero. La implementación de esta tecnología puede ayudar a tener un mejor panorama en la toma decisiones y en la generación de estrategias de conservación y monitoreo de los ecosistemas costeros.

6. Agradecimientos

Agradecemos profundamente a Flores-Flores, Renata por las ilustraciones desarrolladas a mano y posteriormente digitalizadas en el software Photoshop para este trabajo (https://www.instagram.com/chiguio_picaflor?igsh=dzI0NGJvc3dma21m) y a Estrella-Cach, Juan Andrés por las fotos proporcionadas y su apoyo en el levantamiento de datos en campo.

7. Referencias

1. Moreno-Casasola, P.; Peresbarbosa Rojas, E.; Travieso-Bello, A.C. 2006. *Playas y dunas. En: P. Moreno-Casasola, E, Peresbarbosa y A.C. Travieso-Bello. Editores. Estrategias para el manejo integral de la zona costera: un enfoque municipal*; Primera edición.; Instituto de Ecología: Xalapa, Ver. México; ISBN 978-970-709-039-2. Disponible en línea: https://ebusca.uv.mx/Record/207197%20207197 (Acceso el 01 de agosto 2025).

2. Martínez, M.L. 2009. *Las playas y las dunas costeras. Un hogar en movimiento*; LA CIENCIA PARA TODOS; Fondo de Cultura Económica (FCE): Ciudad de México; Vol. 226; 189 p. Disponible en línea: https://www.fondodeculturaeconomica.com/Ficha/9786071601513/F (Acceso el 01 de agosto 2025).
3. Martínez, M L (2008) Dunas costeras. Investig. Cienc. 38, 26-35.
4. Hesp, P. 2024. 2.29 Coastal Dunes: Types, Initiation, Morphology, Evolution, and Relationships to Surfzone-Beach Systems and Climate. In Treatise on Estuarine and Coastal Science (Second Edition). Volume 2, Pages 866-903. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90798-9.00074-3
5. Martínez, M.L.; Moreno-Casasola, P.; Espejel, I.; Jiménez-Orocio, O.; Infante Mata, D.; Rodríguez-Revelo, N.; Cruz González, J.C. 2014. *Diagnóstico de Las Dunas Costeras de México*; CONAFOR; ISBN 978-607-8383-17-7. Disponible en línea: https://www.cienagasyhumedales.org/diagnosticoge (Acceso el 25 de agosto 2025).
6. Ley-Vega de Seoane, C.; Gallego-Fernández, J.; Pascual, C. 2007. Manual de Restauración de Dunas Costeras. *Dir. Gen. Costas*. Disponible en línea: https://www.researchgate.net/publication/235247789_Coastal_dunes_Restoration_Manual (Acceso el 25 agosto 2025).
7. Hesp, P. 2002. Foredunes and Blowouts: Initiation, Geomorphology and Dynamics. *Geomorphology 48*, 245–268, doi:10.1016/S0169-555X(02)00184-8.
8. Psuty, N.P. 2004. The Coastal Foredune: A Morphological Basis for Regional Coastal Dune Development. In *Coastal Dunes: Ecology and Conservation*; Martínez, M.L., Psuty, N.P., Eds.; Springer: Berlin, Heidelberg; pp. 11–27 ISBN 978-3-540-74002-5. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74002-5_2.
9. Maun, M. A. 2009. The Biology of Coastal Sand Dunes. Oxford University Press. Available online: https://doi.org/10.1093/oso/9780198570356.001.0001 (Acceso el 27 noviembre 2025)
10. Pedroza, D; Cid, A; García, O; Silva, R; Villatoro, M; Delgadillo-Calzadilla, M.A; Mendoza, E; Espejel, I; Moreno-Casasola, P; Martínez, M. 2013. Manejo de ecosistemas de dunas costeras, criterios ecológicos y estrategias; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales: Ciudad de México, Mexico, 2013; ISBN 978-607-8246-59-5. Available online: https://www.researchgate.net/publication/323487322_Manejo_de_Ecosistemas_de_Dunas_Costeras_Criterios_Ecologicos_y_Estrategias (acceso el 12 de abril de 2026).
11. López-Chan, J. A; Cutz-Pool, L. Q; Ortiz-León, H. J; Castro-Pérez, J. M; Ibarra-Garibay, L. E; Ramírez-Medina. M. 2014. Microartrópodos de dunas Costeras en la parte norte de Quintana Roo. Entomología mexicana, 1: 476-480.

12. Jiménez-Orocio, O; Espejel, I; Martínez, M. L. 2015. La investigación científica sobre dunas costeras de México: origen, evolución y retos. Revista mexicana de biodiversidad, 86(2), 486-507. https://doi.org/10.1016/j.rmb.2015.04.022
13. Liceaga-Correa, M.A. 2020. Hábitats críticos y hotspots de tortugas marinas. En: Atlas de línea base ambiental del golfo de México (tomo VII). Consorcio de Investigación del Golfo de México. Online: https://www.researchgate.net/publication/354220295_Habitats_criticos_y_hotspots_de_tortugas_marinas (acceso 12 de abril de 2026)
14. Rodríguez-Martínez R. E; Quintana-Pali G; Trujano-Rivera K. I; Herrera R; García-Rivas M. D. C; Ortíz A; Castañeda G; Maldonado G; Jordán-Dahlgren E. 2021. Sargassum landings have not compromised nesting of loggerhead and green sea turtles in the Mexican Caribbean. J Environ Manage. Dec 1;299:113614. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113614.
15. Knott, D. 2010. Atlantic ghost crab (Ocypode quadrata): distribution and ecology in Western Atlantic beaches. online: https://www.dnr.sc.gov/marine/sertc/Ghost%20Crab.pdf (acceso 12 de abril de 2026)
16. Chaves, G. 2013. Phyllodactylus tuberculosus distribution in Mexico and Central America. Zoologica Scripta.
17. Hernández-Gallegos, O; López-Moreno, A. E; Méndez- Sánchez, J. F; Rheubert, J. L; Méndez-de la Cruz, F. R. 2015. Home range of Aspidoscelis cozumela (Squamata: Teiidae): a parthenogenetic lizard microendemic to Cozumel Island, México. Revista de Biología Tropical.
18. Sosa-Escalante, J. E; Pech-Canché, J. M; Mac_Swiney-González, M. C; Hernández Betancourt, S. 2013. Mamíferos terrestres de la península de Yucatán, México: riqueza, endemismo y riesgo. Revista Mexicana De Biodiversidad, 84(3). https://doi.org/10.7550/rmb.33285
19. Pérez-Flores J; Arias-Domínguez H; Arias-Domínguez N. 2020. First documented predation of a Baird's tapir by a jaguar in the Calakmul region, Mexico. Neotropical Biology and Conservation 15(4): 453-461. https://doi.org/10.3897/neotropical.15.e57029
20. Pardo-López, L; Gutiérrez-Ríos, R.M. 2021. Distribución de bacterias. En S. Z. Herzka, R. A. Zaragoza Álvarez, E. M. Peters y G. Hernández Cárdenas. (Coord. Gral.). Atlas de línea base ambiental del golfo de México (tomo X), México: Consorcio de Investigación del Golfo de México.
21. Del Vecchio, S; Rova, S; Fantinato, E; Pranovi, F; Buffa, G. 2022. Disturbance affects the contribution of coastal dune vegetation to carbon storage and carbon sequestration rate. Plant Sociology 59(1): 37-48. https://doi.org/10.3897/pls2022591/04
22. Feagin, R.A.; Furman, M.; Salgado, K.; Martinez, M.L.; Innocenti, R.A.; Eubanks, K.; Figlus, J.; Huff, T.P.; Sigren, J.; Silva, R. 2019. The Role of Beach and Sand Dune Vegetation in

Mediating Wave Run up Erosion. Estuar. Coast. Shelf Sci. 219, 97–106, doi:10.1016/j.ecss.2019.01.018.

23. Martínez, M.L.; Silva, R.; López-Portillo, J.; Feagin, R.A.; Martínez, E. 2020. Coastal Ecosystems as an Ecological Membrane. J. Coast. Res. 95, 97–101, doi:10.2112/SI95-019.1.
24. Hesp, P.A. 2008. Coastal Dunes in the Tropics and Temperate Regions: Location, Formation, Morphology and Vegetation Processes. In Coastal Dunes: Ecology and Conservation; Martínez, M.L., Psuty, N.P., Eds.; Springer: Berlin, Heidelberg; Vol. 171, pp. 29–49 ISBN 978-3-540-74002-5. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74002-5_3.
25. Flor, G.; Flor-Blanco, G. 2014. Componentes de viento generadores de morfologías y campos de dunas costeras en Asturias (no de España). Cuaternario Geomorfol. 28, 47–68. Disponible en línea: https://recyt.fecyt.es/index.php/CUGEO/article/view/29823 (Acceso el 01 de agosto 2025).
26. Miller, T. E; Gornish, E. S; Buckley, H. L. 2010. Climate and coastal dune vegetation: Disturbance, recovery, and succession. Plant Ecology, 206(1), 97-104. https://doi.org/10.1007/s11258-009-9626-z
27. Macías-Rodríguez, M. Á; Alburquerque, F; Azcárate, J. G. 2024. Análisis de la vegetación de las dunas costeras del estado de Jalisco, México. Acta Botanica Mexicana, 131, Article 131. https://doi.org/10.21829/abm131.2024.2308
28. Castillo-Campos, G; Martínez, M. L; García-Franco, J. G; Vázquez, G; Pérez-Maqueo, O; Pale-Pale, J. 2021. First record of naturalization of Scaevola taccada (Gaertn.) Roxb. (Goodeniaceae) in southeastern Mexico. Check List, 17(2). https://doi.org/10.15560/17.2
29. Moreno-Casasola, P; Espejel, I. 1986. Classification and ordination of coastal sand dune vegetation along the Gulf and Caribbean Sea of Mexico. Vegetatio, 66(3), 147-182. https://doi.org/10.1007/BF00039908
30. de Almeida, L.R.; Silva, R.; Martínez, M.L. 2022. The Relationships between Environmental Conditions and Parallel Ecosystems on the Coastal Dunes of the Mexican Caribbean. Geomorphology 397, 108006, doi:10.1016/j.geomorph.2021.108006.
31. Mendoza-González, G.; Aguirre Fierro, J.C.; Badillo Alemán, M.; Hernández-Mendoza, V.B.; Popoca Cruz, P.E.; Tellez-Valdes, O.; Carnevali, G.; Chiappa-Carrara, X. 2025. Catálogo de vegetación de la duna costera de la península de Yucatán; 1st ed.; Escuela Nacional de Estudios Superiores, Mérida, de la Universidad Nacional Autónoma de México: Ucú, Yucatán., ISBN 978-607-587-568-2. Disponible en línea: https://zenodo.org/records/15756437 (acceso el 16 de septiembre de 2025).
32. Guimarais, M.; Zúñiga-Ríos, A.; Cruz-Ramírez, C.J.; Chávez, V.; Odériz, I.; van Tussenbroek, B.I.; Silva, R. 2021. The Conservational State of Coastal Ecosystems on the Mexican Caribbean Coast: Environmental Guidelines for

Their Management. Sustainability, 13, 2738, doi:10.3390/su13052738.

33. Rioja-Nieto R,;Álvarez-Filip L. 2019. Coral reef systems of the Mexican Caribbean: Status, recent trends and conservation. Mar Pollut Bull. Mar;140:616-625. doi: 10.1016/j.marpolbul.2018.07.005. Epub 2018 Jul 11. PMID: 30005908.
34. Alcérreca-Huerta, J.C; Cruz-Ramírez, C.J; de Almeida, L.R; Chávez, V; Silva, R. 2022. Interconnections between Coastal Sediments, Hydrodynamics, and Ecosystem Profiles on the Mexican Caribbean Coast. Land, 11, 524, doi:10.3390/land11040524.
35. Gayosso-Soto, E. 2015. Estructura espacial de la vegetación de duna costera de la zona norte y sur de la reserva de la biosfera de Sian Ka´an, Quintana Roo, México. DOI: 10.13140/RG.2.2.10880.81929.
36. Elizondo, N.C; Infante-Mata, D.C; Rincón-Pérez, M; García-Alfaro, R; Islebe, G.A; Valdéz, M; Troche-Souza, C.H; Camacho-Sandoval, T; Weissenberger; López-Merlín, D. 2016. Diagnóstico sobre el estado actual del ecosistema de duna costera en la costa norte, centro y sur de la Reserva de la Biosfera Sian Ka'an; CONANP, p. 245. Disponible en línea: https://iefectividad.conanp.gob.mx/i-efectividad/I-efectividad atendido/RB Sian Ka´an/DOCUMENTOS/DIAGNOSTICO DEL ESTADO ACTUAL DE LAS DUNAS COSTERAS RBSK 2016.pdf (acceso el 01 de marzo 2024).
37. Espejel, I; Jiménez-Orocio, O; Castillo-Campos, G; Garcillán, P. P; Álvarez, L; Castillo-Argüero, S; Durán, R; Ferrer, M; Infante-Mata, D; Iriarte, S; León de la Luz, J. L; López-Rosas, H; Medel-Narváez, A; Monroy, R; Moreno-Casasola, P; Rebman, J. P; Rodríguez-Revelo, N; Sánchez-Escalante, J; Vanderplank, S. 2017. Flora en playas y dunas costeras de México. Acta Botanica Mexicana 121: 39-81. DOI: http://dx.doi.org/10.21829/abm121.2017.1290
38. Martínez, M.L; Intralawan, .; Vázquez, G; Pérez-Maqueo, O; Sutton, P; Landgrave, R. 2007. The Coasts of Our World: Ecological, Economic and Social Importance. Ecological Economics, 63, 254–272, doi:10.1016/j.ecolecon.2006.10.022.
39. Martínez, M; Lithgow, D; Vázquez, G; Garcia-Franco, J.G. 2016. Capítulo 18. Diagnóstico de Las Necesidades y Probabilidades de Restauración En Las Dunas Costeras de Quintana Roo. In Experiencias Mexicanas en la Restauración de los Ecosistemas.; UNAM; CRIM; UAEM; CONABIO: Ciudad de México, México; pp. 409–431 ISBN 978-607-02-8157-0.
40. Santiago-Contreras, J. F; González-Salvatierrra, C; Carrillo-Bastos, A; Cutz Pool, L. Q; Rosas-Luis, R. 2021. Diversidad, estructura y composición Florística de la duna costera de Mahahual- Xcalak, Quintana Roo. ECTI, EXPERIENCIAS CIENTÍFICAS, TECNOLÓGICAS Y DE INNOVACIÓN. Vol. 1. 100-104.
41. DOF. 2010. NORMA Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección Ambiental-Especies Nativas de México de Flora y Fauna Silvestres-

Categorías de Riesgo y Especificaciones Para Su Inclusión, Exclusión o Cambio-Lista de Especies En Riesgo Disponible en línea: https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4254/semarnat/semarnat.htm (acceso el 26 November 2025).

42. Collantes-Chávez-Costa, A; Alanís-Rodríguez, E; Yam-Uicab, O; López-Contreras, C; Sarmiento-Muñoz, T; Tapia-Muñoz, J. L. (2019). Composition, structure and diversity of coastal vegetation in the northeastern of Cozumel, Mexico. Botanical Sciences, 97(2), 135-147. https://doi.org/10.17129/botsci.2044
43. Gutiérrez-Báez, C; Avendaño-Reyes, S; Zamora-Crescencio, P. (2020). Listado florístico de las dunas costeras de la Península de Yucatán, México. Foresta Veracruzana, 22(2), 1–6.

Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Números Intervalares y su Aritmética: Describir magnitudes y operarlas de acuerdo al razonamiento natural del ser humano

Interval numbers and their arithmetic: Describing magnitudes and operating them according to natural human reasoning

Cázarez-Castro, N.R.[a,b]*, Cabral-Rosetti, L.G.[b]

[a] Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica; Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tijuana; C. P. 22430, Tijuana, Baja California, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6787-3947*.
[b] Departamento de Posgrado; Tecnológico Nacional de México/ Centro Interdisciplinario de Investigación y Docencia en Educación Técnica; C. P. 76000, Santiago de Querétaro, Querétaro, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2417-8412.
nohe.cc@tijuana.tecnm.mx*; luis.cr@ciidet.tecnm.mx

Innovación tecnológica: Definición de números intervalares, desde la perspectiva de lenguaje natural, y sus operaciones.

Área de aplicación: Matemáticas, física e ingeniería.

Recibido: 12 febrero 2026
Aceptado: 08 junio 2026

Abstract

Human beings possess abilities that allow them to observe, study, understand, and modify their environment. These processes have enabled humanity to generate knowledge and develop technology. Mathematics, constructed and developed by humankind, is taught from early childhood, with an emphasis on the symbols that represent magnitudes and their operations. This work presents interval numbers as an alternative for representing magnitudes based on how humans understand, assign meaning to, and make inferences about their environment. Furthermore, it provides definitions for the operations that can be performed with these numbers. Formal definitions are presented, alongside an effort to describe their application in realistic contexts of human life.

Keywords: Interval numbers, arithmetic operations, natural language.

Resumen

El ser humano cuenta con capacidades que le permiten observar su entorno, estudiarlo, entenderlo, modificarlo, entre otros. Estos procesos le han permitido generar conocimiento, desarrollar tecnología, etc. Las matemáticas, construidas y desarrolladas por el ser humano, se enseñan desde la primera infancia, haciendo énfasis en los símbolos que representan magnitudes, y sus operaciones. Este trabajo presenta la noción de intervalo y los números asociados a ellos (números intervalares), como alternativa para representar magnitudes sobre lo que el ser humano entiende de su entorno, cómo le da significado, cómo infiere, y, además, se presenta definiciones de operaciones que se pueden hacer con estos números. Se presentan definiciones formales, y se hace un esfuerzo por describir situaciones de uso en contextos realistas de la vida del ser humano.

Palabras clave: Números intervalares, operaciones aritméticas, lenguaje natural.

1. Introducción

Los primeros acercamientos que tiene una persona con los números son en la primera infancia (Santana-Espitia, 2022; Altúzar Rodríguez, 2024). Previo a que un infante emita su primera palabra, el núcleo familiar se obsesiona con que repita los números, induciéndolos a viva voz, en canciones (Elsa Hernández-Centeno, 2023), e incluso, en otros idiomas, sin dejar de mencionar el uso que se ha dado a las tecnologías de la información y comunicación (TICs) (Reséndiz-Balderas, 2020). En el ámbito educativo formal, la primera experiencia es en nivel preescolar (Altúzar Rodríguez, 2024; Santana-Espitia, 2022; Reséndiz-Balderas, 2020), que abarca los primeros dos o tres años de formación, después, regularmente entre los tres y seis años de edad, donde se incentiva a que se reconozca los símbolos que representan los números, y a que haga relaciones entre el símbolo y cantidad de objetos, induciendo el concepto de conteo (Altúzar Rodríguez, 2024; Santana-Espitia, 2022). En la educación primaria, regularmente de seis años, y posteriores al preescolar, cuando el infante tiene entre 6 y 12 años, se refuerza el concepto de conteo (Dorinda Mato-Vázquez, 2019), la identificación de objetos, y las operaciones aritméticas básicas (Trejo-Guerrero, 2023), que dan soporte al resto de la formación primaria, secundaria (de tres años y posteriores a la primaria), y bachillerado (de tres años y posteriores a la secundaria).

El aprendizaje de los números y sus operaciones es fundamental para avanzar por el sistema educativo. Sin ser explícito, en la mayoría de las ocasiones, se conoce al conjunto de los números naturales, después al conjunto de los números enteros, después al conjunto de los números racionales, se introducen muy intuitivamente los números irracionales ($e, \pi, \sqrt{2}, etc.$) para con ello llegar hasta el conjunto de los números reales, con los cuales, es suficiente para aprender aritmética y resolver muchos problemas de los inducidos en la educación primaria, hasta que, en la educación secundaria, se tiene la necesidad de calcular las raíces de una ecuación de segundo grado, que puede tener raíces complejas conjugadas, y estos temas se dejan para una etapa posterior de formación, que en México, por lo regular, es una educación superior, por ejemplo, en los programas de ingeniería que ofrece el Tecnológico Nacional de México (TecNM), es en la materia Algebra Lineal, donde se introduce el conjunto de números complejos. Sin embargo, en otros países, los números complejos son introducidos mucho antes, en educación secundaria y/o bachillerato.

Aprender sobre los números y sus operaciones permite que se puedan desarrollar temas como el cálculo de áreas y perímetros, tanto de figuras regulares como de figuras irregulares, aprender sobre razones y proporciones, etc. Sin embargo, no se hace una pausa para verificar si lo que se aprende correlaciona con la forma en la que el ser humano, de forma natural, construye conceptos relacionados con su entorno. Aquí cabe preguntarse ¿qué es un número?, y tener claro que, de forma general, un número es un concepto abstracto, pero también es una herramienta matemática fundamental, utilizada para contar, medir, ordenar y etiquetar cantidades y/o magnitudes. Aunado al concepto de número, surge la pregunta ¿qué es medir?, y tener claro que medir es el proceso de comparar una magnitud patrón con otra. Por ejemplo, en física (longitud, masa, tiempo, etc.), con una unidad de medida (referencia o patrón) estándar y constante, para determinar cuántas veces la segunda está contenida en la primera. La acción de medir permite obtener un valor numérico objetivo y preciso, transformando una observación en una representación cuantitativa, ¿es esta definición universalmente válida?

Un problema clásico de matemáticas en educación primaria puede ser el siguiente: "Melitón compró 100 plátanos a $5.00 cada uno ¿Cuánto pagó Melitón por los plátanos?". En este ejemplo, sin lugar a dudas se puede ejercitar la operación de multiplicación e inducir al estudiantado la importancia de la misma. Sin embargo, en el entorno del estudiantado, en su vida cotidiana, los $5.00 que cuesta cada plátano, puede ser irrelevante, ya que, lo que escucha en su entorno es que los plátanos "están caros" o "están baratos", y en este contexto ¿puede determinarse cuánto se tendría que pagar por los plátanos caros y/o por los plátanos baratos?

El ejemplo del párrafo anterior plantea el tema desarrollado en este artículo, la importancia de explorar conjuntos de números que permitan procesar la información de una forma más cercana a como lo hace el ser humano de forma natural, ya que, en la mayoría de las ocasiones, el ser humano utiliza términos lingüísticos para hablar de las magnitudes que percibe del entorno, y en lugar de decir "la temperatura es de 10 grados centígrados", porque quizás no tenga un termómetros para medir la temperatura, simplemente diga "hace frío", porque así lo percibe, con base en su conocimiento, en la mayoría de las ocasiones empírico, o, utilizando magnitudes (números), se usan expresiones como por ejemplo "alrededor de 5 grados" o "más o menos 5 grados", como ejemplos de entorno frío.

Es importante mencionar que en este trabajo predomina una intención divulgativa y pedagógica, sobre intenciones de profundidad matemática conceptual.

2. Conceptos fundamentales

Para matematizar magnitudes vagas, para las cuales no se tiene precisión numérica, por falta de un instrumento de medición, porque el instrumento de medición no es preciso, o por cualquier otro motivo que induzca incertidumbre, es común que se usen expresiones lingüísticas que incluyan términos como "alrededor", "por lo menos", "a lo más", etc., los cuales tienen una representación matemática, los intervalos, mismos que se presentan en la Sección 2.1. Es importante precisar que, no es intención de este artículo intentar presentar a la matemática intervalar, sino dar un enfoque divulgativo-educativo. Literatura original sobre matemática intervalar y sus motivaciones originales pueden encontrarse en Jaulin, L., Kieffer, M., Didrit, O., & Walter, É. (2001), Hansen, E., & Walster, G.

W. (2003), Moore, R. E. (1966), Moore, R. E., Kearfott, R. B., & Cloud, M. J. (2009), Neumaier, A. (1990), Sunaga, T. (1958), Sunaga, T. (2009) y Warmus, M. (1956), y en trabajos que usan intervalos como elemento para el modelado de incertidumbre, como en Chen, G., & Pham, T. T. (2000), Chen, G., & Pham, T. T. (2006), Chen, G., & Shieh, L. S. (1997), Chui, C. K., & Chen, G. (1990), Dubois, D., & Prade, H. (1988), Li, Z., Halang, W. A., & Chen, G. (Eds.). (2006), Lu, J. G., & Chen, G. (2009) y Zadeh, L. A. (1965).

2.1 Invervalos

Relacionando con la recta numérica, un *intervalo*, es representado mediante un segmento de recta, limitado por dos valores reales a y b, tal que $a \leq b$ (a es menor o igual que b), denominándose *límite inferior* a a, y *límite superior* a b.

Los intervalos se clasifican en *intervalos abiertos* e *intervalos cerrados*, siendo un intervalo abierto aquel que no incluye al límite (inferior o superior), y un intervalo cerrado aquel que incluye al límite (inferior o superior). Para denotar apertura en un intervalo se utiliza un paréntesis circular que abre ("(" o ")" para inferior y superior, respectivamente), y para denotar cerradura se utiliza un corchete o coloquialmente conocido como paréntesis cuadrado ("[" o "]" para inferior y superior, respectivamente). En la Figura 1 se puede observar, en la Figura 1 (I) el intervalo (a,b), abierto tanto por la izquierda como por la derecha, en la Figura 1 (II) el intervalo $(a,b]$, abierto por la izquierda y cerrado por la derecha, en la Figura 1 (III) el intervalo $[a,b)$, cerrado por la izquierda y abierto por la derecha, y en la Figura 1 (IV) el intervalo $[a,b]$, cerrado tanto por la izquierda como por la derecha.

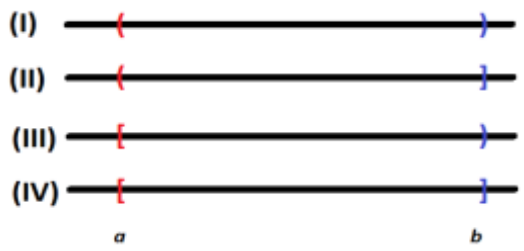


Figura 1. Ejemplificación de intervalos. (I) abierto-abierto, (II) abierto-cerrado, (III) cerrado-abierto, y (IV) cerrado-cerrado.

Nótese que los ejemplos mostrados en la Figura 1 tienen una correlación directa con las expresiones lingüísticas, ya que, por ejemplo, en la Figura 1 (b), puede interpretarse como "más que a, y hasta b", es decir, por la izquierda no se incluye en el intervalo a a, y por la derecha, si se incluye en el intervalo a b.

Dicho lo anterior, a partir de este momento, al *intervalo* se le denomina *número intervalar*.

2.2 Aritmética de intervalos

Sean $A = [a,b]$ y $B = [c,d]$ dos números intervalares (intervalos) de una misma clase de números (universo de discurso). Entonces:

La suma $A + B$, es un número intervalar $C = A + B$, tal que

$$C = A + B = [a,b] + [c,d] = [a + c, b + d]$$

Una representación de la operación suma puede verse en la Figura 2.



Figura 2. Representación de la suma de dos números intervalares.

La sustracción $A - B$, es un número intervalar $C = A - B$, tal que

$$C = A - B = [a, b] - [c, d] = [a - d, b - c]$$

Una representación de la operación sustracción puede verse en la Figura 3.



Figura 3. *Representación de la sustracción de dos números intervalares.*

El recíproco de A, es

$$A^{-1} = [a, b]^{-1} = [b^{-1}, a^{-1}] = \left[\frac{1}{b}, \frac{1}{a}\right]$$

Si $0 \notin [a, b]$ (el cero no pertenece al intervalo, ya que el símbolo $\notin$ representa la no pertenencia a un conjunto). De lo contrario, $A^{-1} = \nexists$ (no existe, ya que el símbolo $\nexists$ representa la no existencia).

El producto AB, es un número intervalar $C = AB$, tal que

$$C = AB = [a, b][c, d] = \Big[\min(ac, ad, bc, bd), \max(ac, ad, bc, bd)\Big]$$

Donde min representa a la función mínimo, que es un mecanismo matemático que regresa el menor valor entre valores dados (para el caso ac, ad, bc y bd), y max representa a la función máximo, que es un mecanismo matemático que regresa el mayor valor entre valores dados (para el caso ac, ad, bc y bd).

Una representación de la operación multiplicación puede verse en la Figura 4.

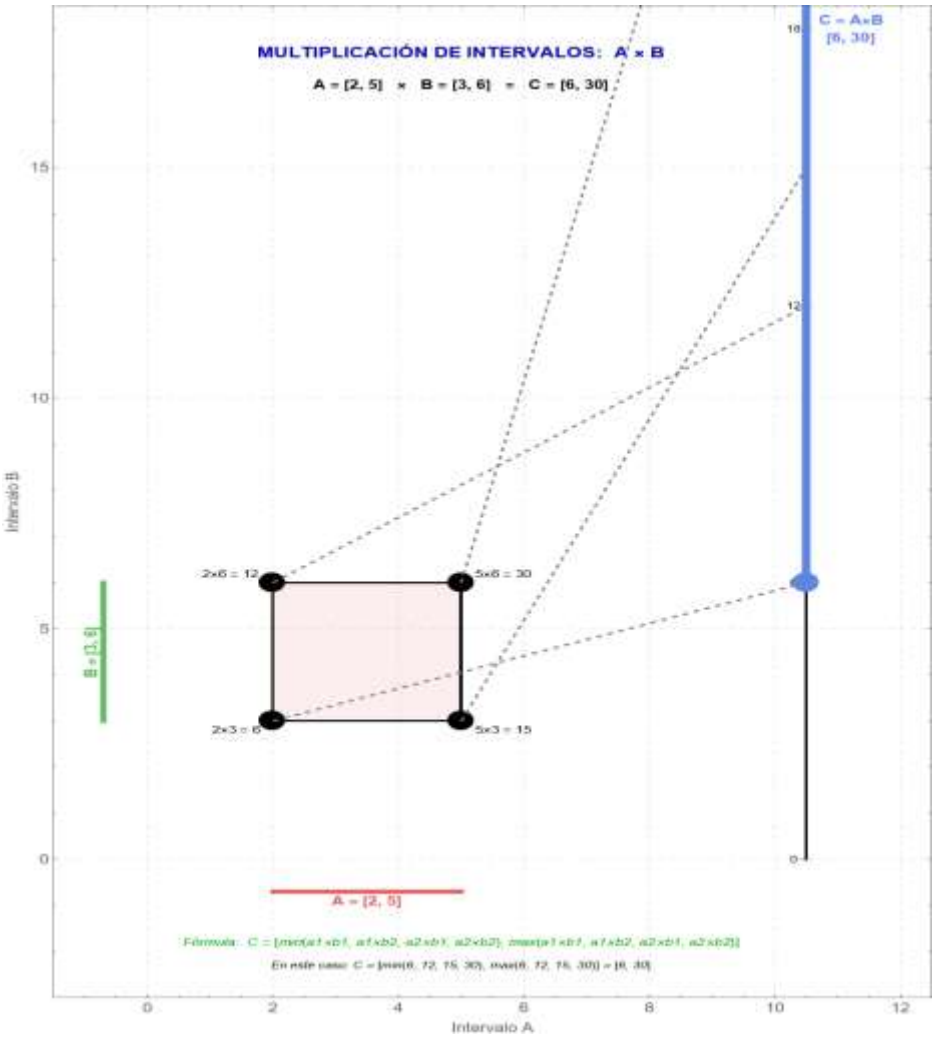


Figura *4.* *Representación del producto de dos números intervalares*.

Nótese que, si $k \in \mathbb{R}$, (k pertenece al Conjunto de los Números Reales $\mathbb{R}$), entonces, $C = kB = [k, k][b, c]$.

El cociente A/B, es un número intervalar

$$C = \frac{A}{B} = \frac{[a, b]}{[b, c]} = [a, b][b, c]^{-1}$$

Nótese que la existencia del cociente depende de B, por la definición de recíproco.

Una representación de la operación división puede verse en la Figura 5.

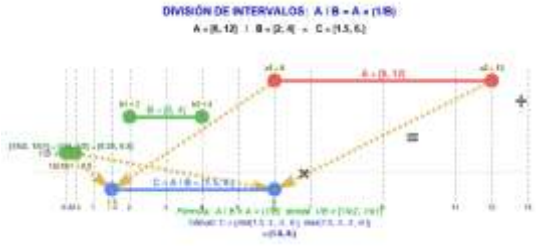


Figura 5. *Representación del cociente de dos números intervalares.*

3. Operaciones básicas, de acuerdo al razonamiento natural del ser humano

Regresando a la motivación del presente trabajo, se presentan a continuación casos de situaciones coloquiales del día a día, en los que la aritmética de números intervalares modelan el razonamiento natural del ser humano, incluyendo incertezas, como las provenientes de procesos de medición. Es decir, números que tienen incerteza intrínseca.

3.1 Sobre la suma

Supóngase que Melitón, el mismo que se mencionó en la Introducción, platica con Manuelita, sobre la necesidad de comprar frijol y tortillas. La plática llega a los precios del frijol y de las tortillas, y Manuelita le dice que "el precio de las tortillas ha subido mucho, "están re-caras", como $30.00 el kilo (aquí usaremos la palabra kilo del habla coloquial como sinónimo de kilogramo), a lo que Melitón responde "no puede ser, si las acabo de comprar a $25.00". Se enfrascan en una discusión sobre los precios, y no pueden llegar a un consenso sobre el precio de las tortillas, y después de un rato de discusión, uno de ellos dice "ya pues, está bien, ***el precio anda entre*** $25.00 y $30.00". Este ejemplo ilustra la forma en la que el ser humano relaciona magnitudes imprecisas, inciertas, estableciendo un rango (intervalo) en vez de un valor puntual, cuando no se tiene certeza sobre algo.

Supóngase que la discusión continúa, y que Melitón dice "bueno pues, y ¿cuánto cuesta el kilo de frijol? Yo lo vi a $45.00", y que Manuelita dice "pues yo creo que como unos $50.00".

De la situación descrita se pueden definir dos números intervalares, uno para el precio del kilogramo de tortillas como

$$Precio\ del\ Kilo\ de\ Tortillas = [25{,}30]$$

Y otro para el kilogramo de frijol como

$$Precio\ del\ Kilo\ de\ Frijol = [45{,}50]$$

Supóngase que Manuelita está platicando con Doña Isabel, su madre, sobre el costo de la vida, que no alcanza el dinero, que hace unos días compraron frijol y tortillas, y que "salió re-caro". Doña Isabel pregunta "¿cuánto pagaron?", a lo que Manuelita responde "no me acuerdo, pero como unos $70.00 u $80.00". Nótese que Manuelita no está dando una cantidad puntual, precisa, pagada por el frijol y por las tortillas, y en vez de eso, refiere a un intervalo, lo cual permite definir el tercer número intervalar.

$$Total\ Pagado = [70{,}80]$$

Que represente el total pagado por Manuelita.

Manuelita, desde su razonamiento, dígase, natural en el ser humano, da una cantidad, con base en lo que puede recordar sobre la plática con su marido Melitón (por cierto, son esposos). La cantidad dicha por Manuelita, es imprecisa, incierta, porque proviene de datos inciertos, pero que pueden ser analizados formalmente, con base en la aritmética de números intervalares. Si, se suman los números intervalares $Precio\ del\ Kilo\ de\ Tortillas$ y $Precio\ del\ Kilo\ de\ Frijol$, se puede calcular el número intervalar correspondiente.

$$\begin{aligned} &Precio\ Pagado\ Calculado\ por\ Frijol\ y\ Tortillas \\ &\quad = Precio\ del\ Kilo\ de\ Tortillas + Precio\ del\ Kilo\ de\ Frijol \\ &\quad = [25{,}30] + [45{,}50] = [25 + 45{,}30 + 50] = [70{,}80] \end{aligned}$$

Que, para el ejemplo, coinciden. O, formalmente.

$$Total\ Pagado = [70{,}80] \in Precio\ Pagado\ Calculado\ por\ el\ Frijol\ y\ las\ Tortillas = [70{,}80]$$

Por supuesto, puede haber ocurrido que

$$Total\ Pagado \notin Precio\ Pagado\ Calculado\ por\ el\ Frijol\ y\ las\ Tortillas$$

Lo cual, tendría sentido, ya que no se está operando con números fijos o nítidos. Sin embargo, se esperaría que, entre más experiencia, conocimiento, destreza, tenga quien hace el razonamiento, se tenga mayor posibilidad de que

$$Total\ Pagado \in Precio\ Pagado\ Calculado\ por\ el\ Frijol\ y\ las\ Tortillas$$

3.2 Sobre la sustracción

Supóngase que continúa la plática entre Doña Isabel y Manuelita, y que Doña Isabel, preocupada por la situación económica de la familia de su hija, le dice a Manuelita "Y ¿van a poder salir adelante con la situación?", a lo que Manuelita responde "la verdad no sé, ese día nos quedamos como con $25.00 para el resto de la semana, Melitón solo se llevó como $100.00 para comprar el frijol y las tortillas".

Del diálogo entre Manuelita y Doña Isabel, nótese que $100.00 se plantea como un número nítido, concreto, cierto. El cual puede escribirse como $[100{,}100]$. Por lo tanto, del diálogo entre Doña Isabel y Manuelita, también se observa que, por un lado, fue Melitón quien fue a hacer la compra, y por otro lado, que Manuelita razona para hacer una operación de sustracción, dígase, "llevaba $100.00, pagó como $75.00 ($Precio\ Pagado\ Calculado\ por\ el\ Frijol\ y\ las\ Tortillas = [70{,}80]$), y le sobraron como $25.00", es decir, después de haber pagado, quedaron alrededor de $25.00, es decir, el sobrante (diferencia) razonado, puede expresarse como el número intervalar.

$$Sobrante\ Razonado = [25 - \alpha, 25 + \alpha]$$

Donde α es una ***cantidad incierta***, haciendo que el $Sobrante\ Razonado$ sea un número intervalar.

Claro está que la forma de modelar matemáticamente esta situación es

$$Sobrante\ Calculado = [100{,}100] - Precio\ Pagado\ Calculado\ por\ el\ Frijol\ y\ las\ Tortillas = [100{,}100] - [70{,}80] = [100 - 20{,}100 - 70] = [20{,}30]$$

Es decir, "alrededor de $25.00".

Es importante mencionar que, en este caso es notorio que, los números reales (comunes y corrientes), denotados como $\mathbb{R}$, se pueden operar con los números intervalares, ya que los números reales son el caso particular cuando $a = b$ en un número intervalar, es decir, cuando el límite inferior es equivalente al límite superior, permitiendo concluir que el conjunto de números reales está contenido (son parte de) en los números intervalares. Esta propiedad es muy importante, pues los números reales (los de toda la vida) están

incluidos como un caso particular de los números intervalares.

3.3 Sobre el producto

Para ejemplificar a la multiplicación de números intervalares, se retoman los 100 plátanos que compraba Melitón en la Introducción de este trabajo, recordando que si bien, el precio era de $5.00 por plátano, el contexto es usar expresiones lingüísticas como "caro" y/o "barato", para lo cual, supóngase que Doña Isabel, Manuelita y Melitón siguen platicando, y se puede modelar que, para ellos, "caro", puede representarse con el número intervalar $caro = [4,6]$. Así pues, el precio a pagar por los 100 plátanos, se obtiene como:

$$Precio\ A\ Pagar\ por\ los\ 100\ Platanos = 100\ caro = [100,100][4,6] = \begin{bmatrix} \min\big((100)(4),(100)(6),(100)(4),(100)(6)\big), \\ \max\big((100)(4),(100)(6),(100)(4),(100)(6)\big), \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \min(400,600,400,600), \\ \max(400,600,400,600), \end{bmatrix} = [400,600]$$

3.4 Sobre el cociente

Se puede plantear un caso inverso al de la Sección 3.3. Supóngase que por algún motivo la familia de Manuelita y Melitón necesitaba los 100 plátanos, y que los compraron. Supóngase ahora, que en momento después de la compra de los plátanos, Doña Isabel, Manuelita y Melitón de nuevo llegan a una plática sobre el costo de la vida, y que recuerdan que pagaron "un dineral, como $500.00" por los plátanos. Como hace tiempo que se llevó a cabo la compra, no tienen ***certeza*** de cuánto pagaron, y/o, de cuánto costaba cada plátano, pero, por algún motivo, recuerdan que fueron 100 plátanos, y necesitan ayuda para determinar cuánto cuesta cada plátano.

Es posible ayudar Doña Isabel, a Manuelita y a Melitón, a calcular el precio por plátano. Considerando que "un dineral" puede representarse de muchas maneras, y no necesariamente como en $Precio\ Pagado\ por\ los\ 100\ Platanos$, defínase

$$Un\ Dineral = [450,550]$$

Así, se calcula el precio por plátano como:

$$\begin{aligned} Precio\ por\ Platano &= \frac{Un\ Dineral}{100} = \frac{Un\ Dineral}{[100,100]} = Un\ Dineral[100,100]^{-1} \\ &= [450,550]\left[\frac{1}{100},\frac{1}{100}\right] \\ &= \begin{bmatrix} \min\left((450)\left(\frac{1}{100}\right),(450)\left(\frac{1}{100}\right),(550)\left(\frac{1}{100}\right),(550)\left(\frac{1}{100}\right)\right), \\ \max\left((450)\left(\frac{1}{100}\right),(450)\left(\frac{1}{100}\right),(550)\left(\frac{1}{100}\right),(550)\left(\frac{1}{100}\right)\right) \end{bmatrix} \\ &= \big[\min(4.5,4.5,5.5,5.5),\max(4.5,4.5,5.5,5.5),\big] = [4.5,5.5] \end{aligned}$$

Es decir, cada plátano costó entre $4.50 y $5.50, es decir, "alrededor" de $5.00.

4 Otras operaciones

Si bien, en el sentido clásico, las operaciones aritméticas básicas son las ya presentadas y

ejemplificadas, existen otras operaciones compuestas, o más complejas, necesarias para completar un conjunto de operaciones necesarias para completar la formación que se obtiene al menos hasta el nivel medio superior. Es por eso que, en esta sección, se presenta la potencia, la raíz n-ésima y el logaritmo.

4.1 Sobre la potencia

Supóngase que Manuelita y Melitón platican sobre la parcela que recibirán como resultado de la reforma agraria derivada de la extinción de latifundios, y Manuelita comenta "Meli, ¿ya sabes cuánto mide la parcela que nos toca? Cipriano (hermano de Manuelita) me dijo que ya repartieron", a lo que Melitón responde "Dijeron que son como 1 hectáreas", a lo que Manuelita comenta "Cipriano dijo que eran como 100 metros de así, y 100 metros de asá (haciendo movimientos con sus manos para indicar a cada lado del cuadrado que representa una parcela, pues la expresión coloquial "así y asá" o "así o asá", se suele utilizar para indicar diversas maneras indefinidas, imprecisas o vagas de hacer algo, similar a decir "de una forma u otra" o "así o asado")" (Ver Figura 6), comentando Melitón "Yo creo que sí, porque fueron 100 pasos de así, y 100 pasos de asá, y acuérdate que la reata que compré era de 20 metros, y le conté 20 pasos".

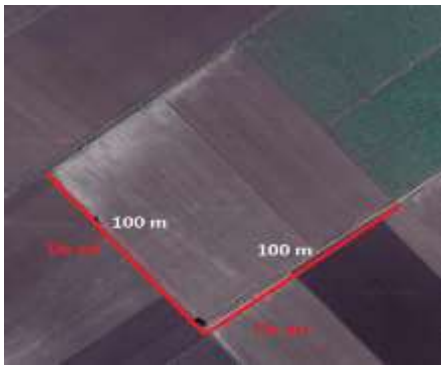


Figura 6. *Representación de una parcela cuadrada. (Edición de Captura tomada de GoogleMaps, 02 de febrero del 2026).*

La situación expuesta puede verse como un problema de cálculo de área, en particular, del área de una superficie que, "al parecer" tiene forma de un cuadrado, que mide como 100 metros por lado. La unidad de medida es el tamaño de paso de Melitón, que no se puede asegurar que es equivalente a un metro, y que, por tanto, no se puede asegurar que es constante, y que, de forma empírica, se intuye que cada paso de Melitón, en la forma en la que lo da para medir, es de "alrededor" de un metro. Entonces, se puede definir

$$Paso\ de\ Meliton = [0.95,1.05]$$

Metros, con lo cual

$$\begin{aligned} Area\ Calculada\ de\ la\ Parcela &= 100\ paso\ de\ Meliton\ 100\ paso\ de\ Meliton \\ &= 100[0.95,1.05]100[0.95,1.05] = [100,100][0.95,1.05][100,100][0.95,1.05] \\ &= [100,100][100,100][0.95,1.05][0.95,1.05] \\ &= \begin{bmatrix} \min\big((100)(100),(100)(100),\cdots,(100)(100)\big), \\ \max\big((100)(100),(100)(100),\cdots,(100)(100)\big) \end{bmatrix} \\ &\quad \begin{bmatrix} \min\big((.95)(.95),(.95)(1.05),(1.05)(.95),(1.05)(1.05)\big), \\ \max\big((.95)(.95),(.95)(1.05),(1.05)(.95),(1.05)(1.05)\big) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \min(10000,10000,10000,10000), \\ \max(10000,10000,10000,10000) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix}\min(0.9025,0.9975,0.9975,1.1025)\,,\\ \max(0.9025,0.9975,0.9975,1.1025)\end{bmatrix} = [10000,1000][0.9025,1.1025]$$
$$= \begin{bmatrix}\min\begin{pmatrix}(10000)(0.9025),(10000)(1.1025),\cdots\\ (10000)(0.9025),(10000)(1.1025)\end{pmatrix},\\ \max\begin{pmatrix}(10000)(0.9025),(10000)(1.1025),\cdots\\ (10000)(0.9025),(10000)(1.1025)\end{pmatrix}\end{bmatrix}$$
$$= \begin{bmatrix}\min(9025,11025,9025,11025)\,,\\ \max(9025,11025,9025,11025)\end{bmatrix} = [9025,11025]$$

Es decir, “alrededor” de 1 hectáreas, lo cual se describe en la Figura 7, en donde las líneas azules representan dimensiones medidas con pasos cortos, y las líneas púrpuras representan dimensiones medidas con pasos largos.

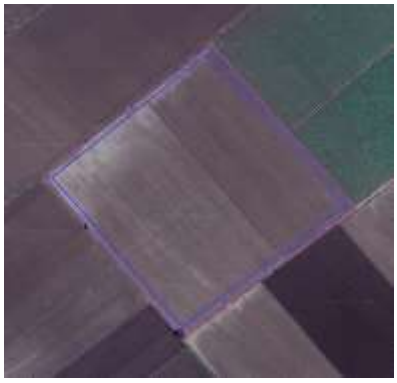


Figura 7. *Representación de una parcela cuadrada, con área de “alrededor” de 1 hectáreas.*
(Edición de Captura tomada de GoogleMaps, 02 de febrero del 2026).

Se puede observar que $Area\ Calculada\ de\ la\ Parcela$ puede ser escrito como

$$Area\ Calculada\ de\ la\ Parcela = 100\ pasos\ de\ Meliton\ 100\ pasos\ de\ Meliton$$
$$= 100^2\ pasos\ de\ Meliton^2 = [100,100]^2[0.95,1.05]^2$$

Describiendo la operación como el producto de dos potencias, definiendo la potencia de un número intervalar como:

La potencia n de un número intervalar A, escrito como A^n, se define como

$$A^n = [a,b]^2 = \left[\min(a^n,b^n)\,,\max(a^n,b^n)\right]$$

Una representación de la operación potencia puede verse en la Figura 8.

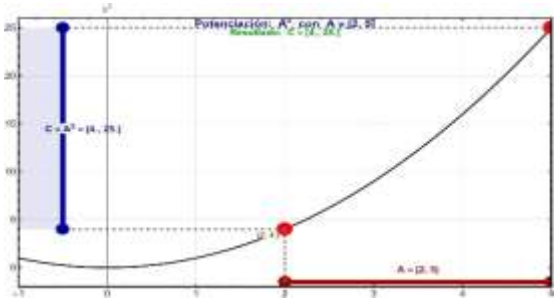


Figura 8. *Representación de la potencia de un número intervalar.*

Nótese que la definición de recíproco es un caso especial de A^n, cuando $n = -1$.

Así pues, $Area\ Calculada\ de\ la\ Parcela$ puede calcularse como

$$Area\ Calculada\ de\ la\ Parcela = [100,100]^2[0.95,1.05]^2$$
$$= \left[\min(100^2, 100^2)\,, \max(100^2, 100^2)\right]$$
$$\left[\min(0.95^2, 1.05^2)\,, \max(0.95^2, 1.05^2)\right] = \left[\min(10000,10000)\,, \max(10000,10000)\right]$$
$$\left[\min(0.9025,1.1025)\,, \max(0.9025,1.1025)\right] = [10000,10000][0.9025,1.1025]$$
$$= \begin{bmatrix} \min\begin{pmatrix}(10000)(0.9025), (10000)(1.1025), \cdots \\ (10000)(0.9025), (10000)(1.1025)\end{pmatrix}, \\ \max\begin{pmatrix}(10000)(0.9025), (10000)(1.1025), \cdots \\ (10000)(0.9025), (10000)(1.1025)\end{pmatrix}\end{bmatrix}$$
$$= \begin{bmatrix}\min(9025,11025,9025,11025)\,, \\ \max(9025,11025,9025,11025)\end{bmatrix} = [9025,11025]$$

Como se había obtenido.

4.2 Sobre la raíz n-ésima

La raíz n-ésima de un número intervalar A, escrito como $\sqrt[n]{A}$ se define como

$$\sqrt[n]{A} \equiv A^{\frac{1}{n}}$$

Tomando como base el ejemplo presentado para la potencia de un número intervalar, supóngase que, Jorge Arturo, hijo de Manuelita y Melitón, y estudiante de ingeniería agronómica, platica con sus papás sobre el reparto de tierras derivado de la reforma agraria. Como Jorge Arturo estaba fuera estudiando, no tenía detalles de las características de la parcela que les fue asignada, y le dice "apá ¿cuánto mide la parcela? ¿Cuántas hectáreas son?", a lo que Melitón responde "dicen que como 10 más o menos", y Manuelita complementa diciendo "un cuadro".

Con la información que obtiene Jorge Arturo de parte de sus papás, puede determinar características de la parcela. Las "como 10 hectáreas más o menos" pueden modelarse como

$$Area\ de\ la\ Parcela = [9950,10050]$$

Ya que, el "más o menos", para Jorge Arturo, representa una diferencia de 50 metros cuadrados que se pueden sumar y restar a las 10 hectáreas.

Considerando que Manuelita comentó que se trataba de "un cuadro" (un cuadrado), y Jorge Arturo sabe que el área de un cuadrado se calcular con el cuadrado de cualquiera de sus lados, la medida de cualquiera de los lados de la parcela (cuadrada) puede calcularse como

$$Lado\ de\ la\ Parcela = \sqrt{Area\ de\ la\ Parcela} = \sqrt{[9950,10050]} = [9950,10050]^{\frac{1}{2}}$$
$$= \left[\min\left(9950^{\frac{1}{2}}, 10050^{\frac{1}{2}}\right), \max\left(9950^{\frac{1}{2}}, 10050^{\frac{1}{2}}\right)\right]$$
$$= \left[\min(99.7496,100.2496)\,, \max(99.7496,100.2496)\right] = [99.7496,100.2496]$$

Es decir, “alrededor” de 100 metros por lado.

4.3 Sobre el Logaritmo

Dado un intervalo $[a, b]$ con $0 < a \leq b$ y una base $c > 0, c \neq 1$, entonces se define el logaritmo con base c, para un intervalo $[a, b]$ como

$$\log_c([a,b]) = \left[\min(\log_c(a), \log_c(b)), \max(\log_c(a), \log_c(b))\right]$$

Pare ser directos, nótese que si $0 < c < 1$, entonces

$$\log_c([a,b]) = [\log_c(b), \log_c(a)]$$

Y que si $c > 1$, entonces

$$\log_c([a,b]) = [\log_c(a), \log_c(b)]$$

Una representación de la operación logaritmo puede verse en la Figura 9.

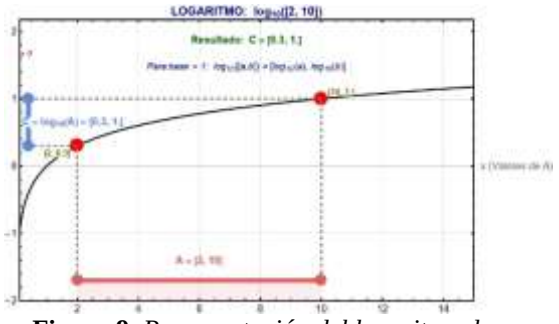


Figura 9. *Representación del logaritmo de un número intervalar.*

Para ejemplificar, supóngase que se reúne la familia de Manuelita y Melitón, y que están con ellos, Doña Isabel, y todos sus hijos y nietos. En la plática, Melitón dice “ahora que ya vamos a sembrar nuestra parcela, sería bueno saber qué tantos elotes van saliendo”, a lo que Jorge Arturo le pregunta “¿y eso apá?, respondiendo Melitón “es que, de pronto un día, uno se da cuenta que hay un elote, luego unos diez, de pronto como 100, hasta que ya no tiene idea uno de cuántos hay”, y todos se quedan pensando en la idea de Melitón.

Ya entrada la noche, a la luz de la luna y las estrellas, Agustín Jaime, hijo de Manuelita y Melitón, y estudiante de ingeniería química, le comenta a Jorge Arturo “qué cosas dice mi apá, es listo el viejo, tiene ideas interesantes”, a lo que Jorge Arturo comenta “¿tú sabes cómo se puede saber eso que quiere saber”, y Agustín Jaime responde “precisamente estamos viendo unos temas poblaciones, potencias, logaritmos y cosas de esas, mañana te digo, ya duérmete”.

Al día siguiente Agustín Jaime le platica a Jorge Arturo que eso que quiere saber “su apá”, se puede resolver con un modelo matemático de la forma

$$Poblacion\ Final = (Poblacion\ Inicial)\left(Factor\ de\ Crecimiento^{tiempo}\right)$$

Y le explica que el $tiempo$ se mide en unidades de tiempo como horas, días, semanas, meses, etc., y que el $Factor\ de\ Crecimiento$ es “qué tanto crece, por ejemplo, un 2, significa que se duplica en una unidad de tiempo”.

Haciendo las manipulaciones algebraicas necesarias determinan que

$$tiempo = \log_k\left(\frac{Poblacion\ Final}{Poblacion\ Inicial}\right)$$

Siguen con su plática y comentan “mi apá dijo que de pronto ve un elote, luego como 10 y luego unos 100, y pues quizás luego unos 1000, por lo que

$$\frac{Poblacion\ Final}{Poblacion\ Inicial} = [100{,}1000]$$

Para de 100 a 1000”, y determinan que para este caso

$$Factor\ de\ Crecimiento = \sqrt[tiempo]{\frac{Poblacion\ Final}{Poblacion\ Inicial}}$$

Y que, si están contando el tiempo en semanas, y quieren saber cuál es el $Factor\ de\ Crecimiento$ en tres semanas, pueden obtenerlo como

$$Factor\ de\ Crecimiento = \sqrt[3]{[100{,}1000]} = \left[\sqrt[3]{100}, \sqrt[3]{1000}\right] = [4.64{,}10]$$

Pero si quisiera conocerse el $tiempo$ necesario para llegar de 1 a entre 100 y 1000, con un $Factor\ de\ Crecimiento$ conocido, supóngase 7, entonces

$$Tiempo = \log_k\left(\frac{Poblacion\ Final}{Poblacion\ Inicial}\right) = \log_7([100{,}1000]) = [\log_7(100), \log_7(1000)] = [2.36{,}3.54]$$

Es decir, “alrededor” de 3 semanas.

6. Conclusiones

El presente trabajo ha demostrado que los procesos de inferencia y comunicación cotidiana del ser humano están naturalmente impregnados de incertidumbre y vaguedad. Lenguajes como "alrededor de", "más o menos", "entre tal y cual" no son deficiencias del pensamiento, sino representaciones honestas de nuestro contacto con un mundo complejo y de mediciones imperfectas. Los números intervalares emergen, por tanto, no como una curiosidad matemática, sino como la formalización natural y necesaria de este razonamiento.

A lo largo de este trabajo, se ha mostrado que es posible construir una aritmética completa y operativa sobre esta base. Desde las operaciones básicas (*suma*, *resta*, *producto y cociente*) hasta otras más complejas como la *potenciación*, la *radicación* y los *logaritmos*, todas ellas pueden definirse de manera rigurosa para los intervalos. Esto permite no solo describir magnitudes imprecisas, sino también *operar con ellas*, realizar inferencias y modelar situaciones realistas (es decir, tal y como el presupuesto familiar, el cálculo de áreas o el crecimiento poblacional) de una manera que refleja fielmente cómo las personas razonan y conversan sobre dichas situaciones.

La importancia de este enfoque trasciende lo teórico y tiene implicaciones profundas en la comprensión misma de la ciencia y la ingeniería. Por ejemplo, es una ficción afirmar que la Aceleración Gravitacional

Terrestre es exactamente 9.81 m/s², que una pieza de cerámica mide exactamente 5.00 cm, o que una corriente eléctrica en un circuito es precisamente de 3.00 A. Toda medición conlleva una incertidumbre intrínseca, ya sea por la limitación del instrumento, las condiciones ambientales o la definición operacional. Esta incertidumbre no es un "error" del que debamos avergonzarnos, sino una característica fundamental de la información empírica que debe ser cuantificada y propagada a través de los cálculos. Los números intervalares ofrecen un marco intuitivo y poderoso para hacer precisamente esto: incorporar la banda de validez de una medición desde el inicio y seguir su rastro a través de cualquier operación posterior.

Por ello, el estudio de los números intervalares y su aritmética no es un tema marginal, sino una herramienta esencial para una formación científica y técnica honesta y robusta. Para el potencial alumno o investigador, dominar este concepto significa:

1. Adquirir un pensamiento más crítico y sofisticado, entendiendo la diferencia entre el modelo matemático ideal y la realidad medida.
2. Contar con un lenguaje matemático directo para el manejo de datos inciertos, común en experimentos, control de calidad, ciencias sociales y toma de decisiones.
3. Sentar las bases para áreas matemáticas y computacionales avanzadas como el análisis de intervalos, la computación con incertidumbre o la lógica difusa, así como las ecuaciones diferenciales difusas, que son pilares en simulaciones, inteligencia artificial y sistemas de tolerancia a fallas.

En conclusión, los números intervalares cierran la brecha entre la precisión abstracta de las matemáticas clásicas y la naturaleza inherentemente aproximada de la experiencia humana y la medición experimental. Invitar a los estudiantes a explorar este campo no es solo mostrarles una nueva aritmética, es invitarlos a construir matemáticas que hablen el lenguaje de la realidad, una realidad donde "entre 9.7 m/s² y 9.9 m/s² de la Gravedad Terrestre" es una respuesta más honesta, profunda y útil que un simple "9.8 m/s²", como la que aparece en la mayoría de los libros de texto de Física General. Este es el camino para formar científicos e ingenieros conscientes de los límites y el poder del conocimiento que generan.

7. Agradecimientos

Este trabajo fue financiado parcialmente por el Tecnológico Nacional de México con los proyectos 24461.26-P, 24952.26-P y 25692.26-P.

8. Referencias

Altúzar Rodríguez, S. N. (2024). La enseñanza de la concepción de números a través del conteo en preescolar {Teaching the conception of numbers through counting in preschool}. Revista Neuronum, 10(2), 103116. doi: https://orcid.org/0009-0006-5589-3004

Chen, G., & Pham, T. T. (2000). Introduction to fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy control systems. CRC Press.

Chen, G., & Pham, T. T. (2006). Introduction to fuzzy systems. Chapman & Hall/CRC.

Chen, G., & Shieh, L. S. (1997). Model conversions of uncertain linear systems using interval multipoint Padé approximation. Applied Mathematical Modelling, 21(9), 543–553.

Chui, C. K., & Chen, G. (1990). An interval Kalman filter for systems with uncertain parameters. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 26(5), 854–859.

Dorinda Mato-Vázquez, A. C.-F., Rocío Chao-Fernández. (2019). Efectos de enseñar matemáticas a través de actividades musicales {Effects of teaching mathematics through music activities}. Revista Latinoamericana de Investigación en Matemática Educativa, 22(2), 163– 184. doi: https://doi.org/10.12802/relime.19.2222

Dubois, D., & Prade, H. (1988). Possibility theory: An approach to computerized processing of uncertainty. Plenum Press.

Elsa Hernández-Centeno, R. R.-R. (2023). La importancia de los cantos en educación preescolar como apoyo en la enseñanza de las matemáticas. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 7(6), 7451- 7466. doi: https://doi.org/10.37811/clrcm.v7i6.9287

Hansen, E., & Walster, G. W. (2003). Global optimization using interval analysis: Revised and expanded (2ª ed.). Marcel Dekker.

Jaulin, L., Kieffer, M., Didrit, O., & Walter, É. (2001). Applied interval analysis: With examples in parameter and state estimation, robust control and robotics. Springer.

Li, Z., Halang, W. A., & Chen, G. (Eds.). (2006). Integration of fuzzy logic and chaos theory. Springer.

Lu, J. G., & Chen, G. (2009). Robust stability and stabilization of fractional-order interval systems: An LMI approach. IEEE Transactions on Automatic Control, 54(6), 1294–1299.

Moore, R. E. (1966). Interval analysis. Prentice-Hall.

Moore, R. E., Kearfott, R. B., & Cloud, M. J. (2009). Introduction to interval analysis. Society for Industrial and Applied Mathematics

Neumaier, A. (1990). Interval methods for systems of equations. Cambridge University Press.

Reséndiz-Balderas, E. (2020). Análisis del discurso y desarrollo de la noción de número en preescolar y el uso de las tic {Discourse analysis, development of number sense in preschool education and ICT use}. CienciaUAT, 14(2), 72- 86. doi: https://doi.org/10.29059/cienciauat.v14i2.1237

Santana-Espitia, O. Y.-T.-O. H., A.C. (2022). Aprendizaje del conteo y los números naturales en preescolar: una revisión sistemática de la literatura {Preeschol children's Learning of Counting and the Natural Numbers: A Systematics Literature Review}. Universitas Psychologica, 21, 1-16. doi: https://doi.org/10.11144/Javeriana.upsy21.acnn

Sunaga, T. (1958). Theory of an interval algebra and its application to numerical analysis. RAAG Memoirs, 2, 29–46.

Sunaga, T. (2009). Theory of an interval algebra and its application to numerical analysis. Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics, 26(2-3), 125–143.

Trejo-Guerrero, L. (2023). La enseñanza de la adición con números naturales en la escuela primaria multi-grado {Teaching natural number sums in multi-grade primary school }. Educación matemática, 35(1), 142168. doi: https://doi.org/10.24844/em3501.06

Warmus, M. (1956). Calculus of approximations. Bulletin de l'Académie Polonaise des Sciences, Classe Troisième, 4(5), 253–257.

Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. Information and Control, 8(3), 338–353.

Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Comparación de los métodos de reciclaje empleados en los módulos fotovoltaicos de c-Si

A comparison of the recycling methods used for c-Si photovoltaic modules

Cabrera-Hernández, M.[1], Ramírez-Amador, R.[2]*, Jiménez-Xochimitl, S.[1], Cortés-Maldonado, R.[2], López-Hernández, O.[1]

[1] Facultad de Ciencias de la Electrónica, Ingeniería en Energías Renovables, FCE-BUAP, Puebla, México. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-7292-5085, https://orcid.org/0009-0003-6736-1409, https://orcid.org/0009-0001-6891-3952.

[2] Tecnológico Nacional de México/IT Apizaco, Av. Instituto Tecnológico No. 418, San Andrés Ahuashuatepec, Tzompantepec, 90491, Tlaxcala, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0716-4596*, https://orcid.org/0000-0001-8463-1325.

cabrerah.mariana@gmail.com; raquel.ra@apizaco.tecnm.mx*; sanjim@hotmail.com; raul.cm@apizaco.tecnm.mx; osvaldo.lopezhe@correo.baup.mx

Innovación tecnológica: Identificar los métodos de reciclaje en módulos fotovoltaicos con la finalidad de poder reciclar el material de estos, después de que terminan su vida útil.

Aplicación industrial: Crear un enlace entre los centros de recolección, plantas de reciclaje y fabricantes de módulos fotovoltaicos o empresas de interés, para reintegrar materiales recuperados en la cadena productiva.

Recibido: 04 diciembre 2025
Aceptado: 27 mayo 2026

Abstract

The recycling of photovoltaic modules that have reached the end of their useful life is an issue that has taken on greater importance worldwide due to the growing development of solar photovoltaic energy; Although first-generation photovoltaic modules (crystalline silicon) have an average lifespan of 25 years, it is important to pay attention to those photovoltaic installations that are reaching the end of their useful life or that are failing in the early stages of operation, as these devices may contain both valuable and toxic elements. In this study, research was conducted on methods for recycling crystalline silicon photovoltaic modules, as this is the predominant technology in the global market. Through detailed research, it was found that various methods and stages have been developed to separate the elements that make up photovoltaic modules, as well as to recycle each of their components at different stages of the recycling process. The findings indicate that certain countries in Europe and Asia dominate this field, while Latin America has a lower level of involvement. Furthermore, the most widely used technique for recycling

photovoltaic modules is mechanical delamination. This approach dominates the recycling market, as it is a cost-effective, technically feasible, and easily scalable process, with high processing capacity and low energy consumption, making these findings worthy of consideration by companies involved in recycling.

Keywords: Mechanical methods, thermal methods, chemical methods, crystalline silicon photovoltaic modules, photovoltaic module recycling.

Resumen

El reciclaje de los módulos fotovoltaicos que han llegado al final de su vida útil es un tema que, a nivel mundial, ha tomado una mayor importancia debido al creciente desarrollo de la energía solar fotovoltaica; si bien, los módulos fotovoltaicos de primera generación (silicio cristalino), tienen una vida útil promedio de 25 años, es importante prestar atención a aquellas instalaciones fotovoltaicas que están llegando al final de su vida útil y que presentan fallos en etapas tempranas de la instalación, ya que estos dispositivos pueden contener tanto elementos valiosos como elementos tóxicos. En este trabajo, se llevó a cabo una investigación sobre los métodos de reciclaje de módulos fotovoltaicos de silicio cristalino, por ser la tecnología predominante en el mercado mundial. Por medio de una investigación detallada, se encontró que se han desarrollado diferentes métodos y etapas para lograr una separación de los elementos que conforman a los módulos fotovoltaicos, así como para el reciclaje de cada uno de sus componentes en las diferentes etapas que conforman el proceso de reciclaje. Al término de este estudio, se pudo apreciar que algunos países de Europa y Asia son los que predominan en este campo y con una menor participación en Latinoamérica, además de que la técnica que más se usa para el reciclaje de módulos fotovoltaicos, es delaminación mecánica, el cual es uno de los métodos que más abarca el mercado de reciclaje, ya que es un proceso rentable, técnicamente factible y fácil de escalar, con alta capacidad de procesamiento y de bajo consumo energético, lo que permite que este estudio pueda ser considerado por empresas que se dedican al reciclaje.

Palabras clave: métodos mecánicos, métodos térmicos, métodos químicos, módulos fotovoltaicos de silicio cristalino, reciclaje de módulos fotovoltaicos.

I. Introducción

A nivel mundial, a partir del año 2000, el aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica ha tenido un gran crecimiento, de acuerdo con la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA, por sus siglas en inglés), donde se espera que para el año 2050, a nivel mundial, se alcance una capacidad instalada de 4,500 GW (Weckend *et al.* 2016). Por su parte, México es identificado como un país generador de energía solar fotovoltaica, ya que la IRENA reportó que hasta marzo del 2024 se tuvieron 10,910 MW instalados. Sin embargo, la gestión de los módulos fotovoltaicos al final de su vida útil se ha abordado muy poco, ya que las empresas responsables consideran que es una tecnología reciente que tiene muchos años de vida por delante. Desafortunadamente, no se han tomado en cuenta aquellas fallas que pueden afectar a los dispositivos en una etapa temprana o media de su vida útil (Rodríguez *et al*. 2017; IRENA, 2024).

Los componentes mayoritarios de los módulos fotovoltaicos son: vidrio, polímeros y aluminio, que representan alrededor del 90% de la masa total del módulo y son clasificados como residuos no peligrosos. Por otro lado, los componentes minoritarios como plata, estaño y plomo, se clasifican como materiales peligrosos, ya que representan un peligro para el medio ambiente y la salud de los seres vivos si no se tratan de manera adecuada. La cantidad de plomo contenida en un módulo fotovoltaico de silicio cristalino, con un peso de alrededor de 22 kg, es de aproximadamente 12.67 gramos. Si estos dispositivos se desechan en tiraderos a cielo abierto y son lixiviados por la lluvia, pueden liberar entre el 13% y el 90% de la cantidad de plomo contenida. Algunos investigadores han realizado evaluaciones eco toxicológicas, donde predijeron que durante los primeros meses después de su eliminación, los módulos mantienen su integridad debido al encapsulante, el cual está hecho de un polímero denominado etileno vinil acetato (EVA). Sin embargo, con el paso del tiempo los módulos pueden estar sometidos a diferentes cargas y pH, provocando la degradación del EVA, liberando alrededor de 30 toneladas de plomo para 2050 (Camargo *et al*. 2021).

Hasta 2018, a nivel mundial, sólo se reciclaba alrededor del 10% de los módulos fotovoltaicos que llegaban al final de su vida útil. El reciclaje de estos dispositivos puede favorecer la recuperación de energía y materiales, así como la reducción de emisiones de CO_2 (Dióxido de Carbono) relacionadas con esta industria (Reyes, 2013). Por ello, es necesario que se prevean e implementen mecanismos en materia de reciclaje de módulos fotovoltaicos, permitiendo lograr una planeación adecuada, estableciendo objetivos a mediano y largo plazo, donde se promuevan acciones en beneficio del medio ambiente y evitando que estos dispositivos sean desechados en tiraderos a cielo abierto, permitiendo la recuperación, reutilización y valorización de los materiales contenidos (Francovigh, 2023).

II. Desarrollo

Los módulos fotovoltaicos son dispositivos conformados por capas de diferentes materiales. Su componente de generación eléctrica son las celdas solares, ya que estos dispositivos convierten las partículas energéticas de la luz solar en energía eléctrica por medio de su incidencia en la superficie del material semiconductor (Inguanzo Saucedo *et al. 2016;* Casas Rueda & Cordero Castellanos, 2023). Los módulos fotovoltaicos de primera generación están conformados por celdas solares de silicio cristalino, formadas por la unión de semiconductores n-p, dopados con boro y fósforo. En la Figura 1 se muestra la conformación en capas a los módulos fotovoltaicos de primera generación (Casas Rueda & Cordero Castellanos, 2023; Wang *et al*. 2022).

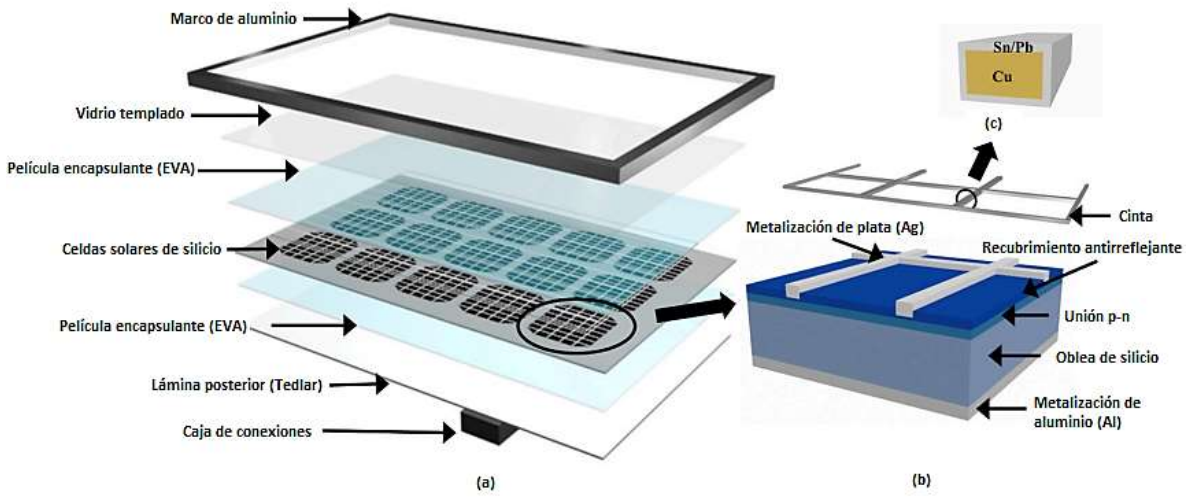


Figura 1. *Conformación del módulo fotovoltaico de silicio cristalino. (a) Estructura del módulo fotovoltaico c-Si, (b) Composición de la celda solar c-Si, (c) Estructura de la cinta fotovoltaica; adaptada de (Wang et al. 2022).*

En 1990, en la Unión Europea, un grupo de científicos identificó que estos dispositivos podían ser reciclados, ya que se tenía una cantidad significativa de instalaciones fotovoltaicas que, más adelante, podrían representar un problema si únicamente eran desechados de manera convencional. Sin embargo, durante los estudios realizados, determinaron que la eliminación de la capa de encapsulante sería una tarea desafiante, y que posee gran adhesión para aislar a las celdas solares del aire y la humedad (Suárez *et al. 2023; Universidad de la Laguna, 2017.;* Latunussa *et al. 2016).*

Alrededor del 85% de los módulos fotovoltaicos instalados a nivel mundial corresponden a la tecnología de silicio cristalino (c-Si). Sin embargo, las características físicas de cada dispositivo varían de acuerdo a su fabricante. El reciclaje de estos dispositivos se enfoca en disminuir los desechos, reducir el impacto ambiental que los dispositivos generan al final de su vida útil, además de ser un proceso esencial para el desarrollo sostenible de la energía solar (Maani *et al*. 2020; Universidad de Antofagasta, 2022; Späth *et al*. 2022).

Considerando la conformación en capas de los módulos fotovoltaicos, se requieren diferentes procesos para separar los elementos. Las etapas de reciclaje de estos dispositivos se dividen en (Cabrera Hernández, 2024):

- Desmantelamiento: Separación del marco de aluminio y cableado externo; se lleva a cabo por medio de procesos mecánicos, ya sea manuales o automatizados.
- Delaminación: Separación de las capas que conforman los módulos fotovoltaicos, pudiendo triturar al módulo, fundir o diluir el EVA; se han desarrollado diferentes procesos para lograr la separación de las capas, dentro de los cuales se conocen procesos mecánicos, procesos térmicos y procesos químicos.
- Separación y purificación de materiales: Separación de los materiales que conforman la celda solar (Si, Cu y Ag); para este paso, se han desarrollado procesos químicos para la recuperación y purificación de los elementos.

Se identificó que, en algunos países, principalmente en aquellos pertenecientes a la Unión Europea, se han desarrollado e implementado procesos de reciclaje a escala industrial donde algunas de las empresas especializadas en el reciclaje de los módulos fotovoltaicos llevan a cabo procesos de reciclaje de alto valor, cuyo principal objetivo es recuperar la mayor cantidad de elementos del laminado solar para darle una segunda vida útil y, de este modo, contribuir a la economía circular. Algunas de las principales empresas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Proceso de reciclaje llevado a cabo por empresas a escala industrial.

Empresa	Tipo de planta	Capacidad de procesamiento	Proceso de reciclaje	Consumo energético
Reiling Glas Recycling, Alemania	Reciclaje de vidrio y módulos fotovoltaicos	10,000 – 50,000 ton/año	Proceso mecánico (trituración del módulo)	≈ 60 kWh/ton
LuxChemtech GmbH, Alemania	Reciclaje de módulos fotovoltaicos	1,000 ton/año (planta piloto)	Proceso mecánico (trituración por chorro de agua) + grabado químico para recuperar metales	≈ 130 kWh/ton
Flaxres, Alemania	Reciclaje de módulos fotovoltaicos	1,000 ton/año (planta piloto)	Proceso térmico (delaminación por pulsos de luz)	≈ 60 kWh/ton
ROSI SAS, Francia	Reciclaje de módulos fotovoltaicos	3,000 ton/año	Proceso térmico (incineración del laminado solar) + grabado químico para recuperar metales	No divulgado
Tialpi SRL, Italia	Reciclaje de módulos fotovoltaicos	1,000 – 3,000 ton/año	Proceso térmico (pirólisis del laminado solar) + lixiviación química + electrólisis para recuperar metales	≈ 136 kWh/ton
Shynrio Corporation, Japón	Reciclaje de módulos fotovoltaicos	1,440 ton/año	Proceso térmico (pirólisis del laminado solar)	No divulgado
Solar Cycle, EE.UU.	Reciclaje de módulos fotovoltaicos	50,000 ton/año	Proceso mecánico (trituración del laminado solar)	No divulgado
Rafiqui, México	Reciclaje de módulos fotovoltaicos	1,000 ton/año	Proceso mecánico (trituración del laminado solar)	Proceso en desarrollo

Elaboración propia con datos de (Cabrera Hernández, 2024; Wambach *et al.* 2024; Collins, 2023).

Sin embargo, la planta recicladora mexicana, Rafiqui, ubicada en Jalisco, recibió su equipo de reciclaje en enero del presente año, permitiendo iniciar con su proceso de reciclaje industrial, ya que estuvo en un proceso de fabricación durante algunos meses. Sin embargo, esta asociación civil, en conjunto con la asociación Second Life of Solar, se encuentran desarrollando un proyecto para la intervención de artistas dentro del sector fotovoltaico, permitiendo convertir los módulos fotovoltaicos en piezas de arte, dando una alternativa de reúso y valorización (Usla, H., 2025).

La combinación de diferentes procesos y métodos, da paso a la recuperación de los componentes que conforman a los módulos fotovoltaicos (Latunussa *et* al. 2016; Cabrera Hernández, 2024). En la actualidad, se han desarrollado dos principales fases para el reciclaje de estos dispositivos, los cuales se muestran en la Figura 2.

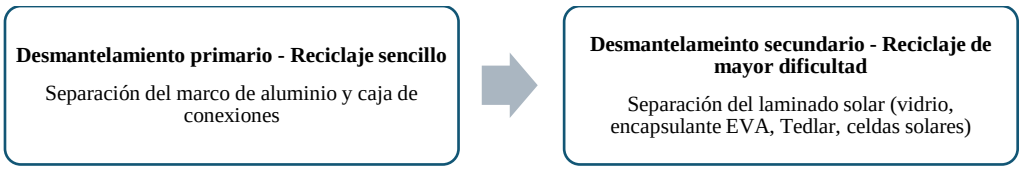


Figura 2. *Rutas de reciclaje consideradas para el reciclaje de los módulos fotovoltaicos; adaptada de (Suárez, 2023).*

A su vez, se tiene 2 posibles rutas para el reciclaje de estos dispositivos (Cabrera Hernández, 2024; Deng *et al.* 2019; Späth *et al.* 2022):

1. Ruta de reciclaje de bajo valor: Consiste en extraer materiales contaminados, teniendo un bajo valor en la reutilización y costo de los mismos. Se enfoca principalmente en recuperar los elementos mayoritarios.
2. Ruta de reciclaje de alto valor: Consiste en un proceso de mayor complejidad, donde se separan las capas que conforman al módulo fotovoltaico y se recupera la mayor cantidad de elementos minoritarios presentes en las celdas solares con una menor contaminación.

Es por ello que se han desarrollado y llevado a cabo diferentes procesos de delaminación del laminado solar, permitiendo separar y recuperar los elementos que conforman a los módulos fotovoltaicos. Algunos de los procesos estudiados a escala laboratorio y aplicados a escala industrial son los que se presentan en la Figura 3.

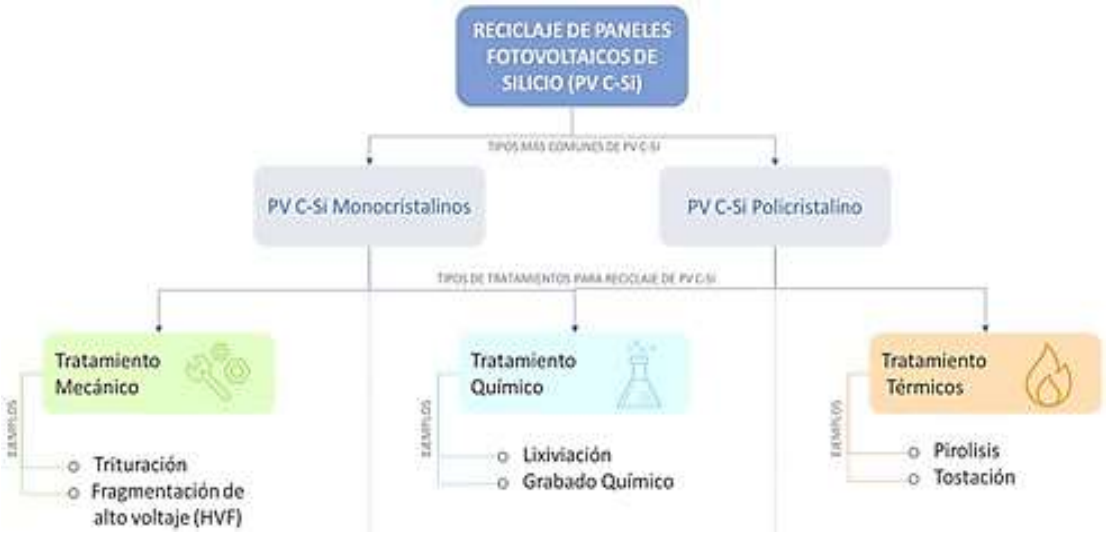


Figura 3. *Métodos de reciclaje aplicados para paneles c-Si (Universidad de Antofagasta, 2022).*

Métodos mecánicos: Se basan en la trituración del módulo para separar los elementos mayoritarios de los módulos fotovoltaicos, logrando una alta recuperación de material por masa. Sin embargo, los elementos minoritarios no pueden ser recuperados por completo. Este tipo de procesos son fáciles de aplicar, escalar, además de ser rentables. Algunos de los procesos que se han desarrollado en la actualidad son:

- Doble trituración después del desmontaje del marco de aluminio, obtenido un mayor porcentaje de vidrio recuperado.

- Trituración del módulo con pulsos de alto voltaje en un medio acuoso, obteniendo selectividad en las partículas y disminuyendo los puntos de contacto.
- Sistema automatizado para delaminación mecánica, se trata de un equipo desarrollado por un fabricante chino y, en la actualidad, es utilizado a escala industrial.

Métodos térmicos: Se basan en la descomposición progresiva de los polímeros presentes en los módulos fotovoltaicos (EVA y Tedlar) por medio de la aplicación de un gradiente de temperatura. Algunos de los procesos que se han desarrollado en la actualidad son:

- Delaminación térmica de 2 etapas de calentamiento bajo una atmósfera oxidante, donde, inicialmente, se retira el Tedlar (ver Figura 1) y se procede a la aplicación de un proceso térmico para degradar el EVA.
- Pirólisis de 2 etapas para delaminación térmica, donde se retira inicialmente el Tedlar calentando ligeramente el EVA, y se continúa con un proceso pirolítico bajo una atmósfera de nitrógeno para la degradación del EVA.
- Delaminación térmica con pretratamiento, donde se despegó la lámina trasera (Tedlar) del laminado solar, y el resto del laminado se sometió a un proceso de combustión.

Métodos químicos para delaminación: Se basan en la separación de los componentes que conforman a los módulos fotovoltaicos. Su principal objetivo es la degradación química del EVA, obteniendo materiales de alta pureza. Algunos de los procesos que se han desarrollado en la actualidad son:

- Delaminación solvotérmica. En este estudio, el principal objetivo fue el hinchamiento del EVA con ayuda de tolueno y etanol bajo una concentración de 0.2 M a 190°C después de un tratamiento de 2 horas, permitiendo recuperar las celdas solares intactas con ayuda de tolueno y etanol.
- Delaminación química con microondas, donde se utilizó tricloroetileno bajo una concentración de 4 mol/L a 70°C durante 2 horas y microondas, permitiendo reducir el tiempo de separación del EVA del resto de los elementos.
- Delaminación química con CO_2 supercrítico ($ScCO_2$), donde se utilizó tolueno con una relación sólido-líquido de 1-12 a 189° durante 45 minutos y $ScCO_2$ para la separación de los componentes por la degradación e hinchamiento del EVA.

Métodos químicos para purificación: Se basan en la purificación de los elementos minoritarios recuperados; los procesos que se han desarrollado son:

- Lixiviación ácida o alcalina, permiten separar los metales presentes en las celdas solares, disolviendo los electrodos de la celda solares, así como

impurezas adicionales debidas a los procesos de delaminación.
- Grabado químico, buscando recuperar el silicio, disolviendo las capas superficiales fuertemente dopadas (capa antirreflejante y uniones n-p).

III. Resultados y Discusión

Después de estudiar los métodos de reciclaje desarrollados a escala de laboratorio, se determinó que un proceso de reciclaje para módulos fotovoltaicos consiste en las etapas mostradas en la Figura 4, donde la etapa que más se ha estudiado es la delaminación del laminado solar, ya que, por la estructura del módulo fotovoltaico, el encapsulante EVA, que protege a las celdas solar del ambiente y actúa como adhesivo entre las diferentes capas, dificultando su separación.

El principal objetivo del reciclaje es recuperar materias primas con alta pureza para que éstas puedan ser reintroducidas al mercado. Para ello, se combinan los diferentes métodos, dando lugar a mayores tasas de recuperación y materiales menos contaminados.

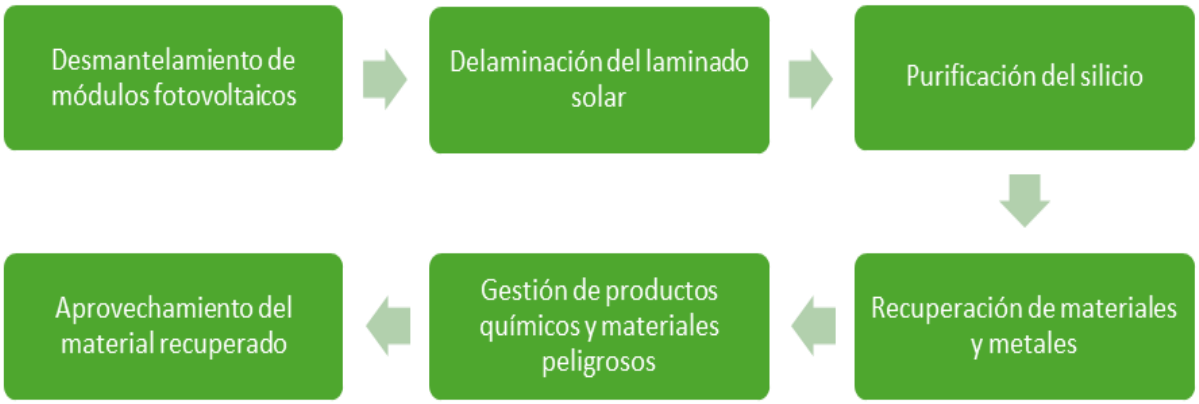


Figura 4. *Proceso de reciclaje para los módulos fotovoltaicos de silicio cristalino.* *Elaboración propia.*

Una ruta de reciclaje de alto valor ha logrado tener un menor impacto ambiental en comparación con una ruta de reciclaje de bajo valor, la cual es la más recomendable y menos costosa para el medio ambiente, que se enfoca en recuperar diferentes materiales para reintroducirlos a la cadena de valor en lugar de generar materiales primarios (Maani *et al*. 2020). Con base en la literatura estudiada sobre los métodos para el reciclaje para módulos fotovoltaicos c-Si, se presenta cada una de las etapas estudiadas para el reciclaje de estos dispositivos:

1. Desmantelamiento del módulo fotovoltaico

Su principal objetivo es dejar expuesto el laminado solar, por lo cual, se retira el marco de aluminio y la caja de conexiones. Este proceso es meramente mecánico (In-Data & RIGK, 2020), por lo que, únicamente puede llevarse a cabo de 2 formas, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Tabla comparativa de los procesos de desmantelamiento, ventajas y desventajas.

Proceso de desmantelamiento	Descripción	Ventajas	Desventajas
Manual	Por medio de destornilladores y sierras eléctricas puede cortar y separar el marco de aluminio y la caja de conexiones, dejando el laminado solar expuesto.	Proceso útil para módulos de diferentes tamaños, ya que no requiere de equipo especializado y se puede realizar sin complicación. El costo inicial es bajo.	Proceso prolongado, requiere de personal para realizar el proceso, quienes pueden estar expuestos a cortes. Es ideal para procesos con bajo volumen de procesamiento
Automatizado	Por medio de equipo automatizado se realiza la separación del marco de aluminio y la caja de conexiones, permitiendo obtenerlos por separado, liberando el laminado.	Es un proceso fácil, rápido y reduce la interacción humana en esta etapa del proceso de reciclaje. Se puede procesar gran volumen de módulos en corto tiempo	Al momento, el equipo solo se comercializa en el extranjero, pudiendo incrementar la inversión inicial para la compra de equipo y maquinaria.

Elaboración propia con datos de (Cabrera Hernández, 2024; In-Data & RIGK, 2020).

Los equipos de desmantelamiento automatizado son fabricados en el extranjero (Cabrera Hernández, 2024). Faircloth *et al*. (2019), establecen que se puede construir/adaptar un equipo para el desmantelamiento automatizados del marco de los módulos fotovoltaicos con ayuda de un robot cartesiano de 3 ejes.

- ***Delaminación del laminado solar***

El grado de separación de los elementos del laminado solar permiten determinar el valor de los materiales recuperados.

Los procesos de delaminación mecánica se basan en triturar el laminado, permitiendo obtener un tamaño de partícula que rompa con la estructura laminada. Para ello, es necesario repetir el proceso de 3 a 6 veces, produciendo una contaminación cruzada de los elementos del laminado solar. Por ello, es recomendable implementar un proceso de separación mecánica de materiales al finalizar con la trituración del laminado solar. La distribución de partículas, después de realizar la trituración y molienda del laminado, permite una mejor distribución de acuerdo con el tamaño de partícula obtenido, como se muestra en la Figura 5, dando paso a la separación de los elementos por medio de un cribador vibratorio.

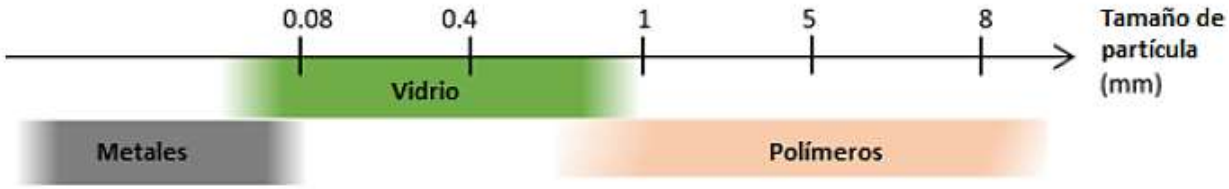


Figura 5. *Distribución de partículas de acuerdo con su tamaño después de un proceso de molienda y trituración (Éleonore, 2020).*

Los procesos de delaminación térmica se basan en la degradación del encapsulante EVA y la lámina posterior, permitiendo la recuperación de las celdas solares. Sin embargo, su degradación térmica es un proceso que requiere de una gran demanda energética (> 60 kWh/ton) y, a su vez, produce gases contaminantes, como dióxido

de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), dioxinas y furanos, vapor de agua, compuestos orgánicos volátiles (COVs) como metano, etano, propano, butano y plomo, siendo compuesto nocivos para la salud y el medio ambiente (Cabrera Hernández, 2024).

Los procesos de delaminación química se enfocan en la degradación del encapsulante EVA por medio de reactivos químicos. Sin embargo, se ha determinado que no es in process viable para tener una aplicación industrial, ya que tienen una larga duración, baja rentabilidad y son requeridas altas cantidades en el suministro de productos químicos, pues se identificó que pueden utilizarse entre 7 a 46 kg por proceso. Por otro lado, con base en los procesos de delaminación química estudiados, se identificó que el encapsulante EVA permanecía adherido a las celdas solares, por lo que se requería un proceso térmico adicional para eliminar completamente el encapsulante de la celda solar (Cabrera Hernández, 2024).

El principal objetivo de los procesos de delaminación térmica y química es recuperar la celda solar de manera ininterrumpida, para que pueda ser reutilizada en la fabricación de módulos fotovoltaicos. Sin embargo, las altas temperaturas dañan la integridad de la celda, así como algunos agentes químicos, ya que generan grietas en su superficie o conducen a su ruptura (Maani *et al.* 2020*;* Deng *et al.* 2019).

En la Tabla 3 se muestra una comparación entre los procesos de delaminación mecánica, térmica y química, considerando su tasa de recuperación y pureza de los elementos recuperados, materiales recuperados por cada proceso, ventajas y desventajas.

Tabla 3. Comparativa de los procesos de delaminación identificados.

Criterio	Delaminación mecánica	Delaminación térmica	Delaminación química
Tasa de recuperación	Vidrio: ≈ 85 – 90 % en partículas entre tamaños de 0.08 y 0.3 mm Celda solar: ≈ 95 – 98 % en partículas menores de tamaño menor a 0.08 mm Metales: ≈ 95 – 98 % en partículas menores de tamaño menor a 0.08 mm EVA y Tedlar: ≈ 95% con restos de vidrio en partículas de tamaño mayor a 1 mm	Vidrio: ≈ 100% con contaminación superficial de metales Celda solar: ≈ 100% recuperada en pedazos Metales: ≈ 98 – 99 % Tedlar: 100% fue retirado previo al proceso de combustión EVA: 0% degradado	Vidrio: ≈ 99% Celda solar: ≈ 85% con restos de EVA adheridos Metales: ≈ 99% de filamentos de plomo Tedlar: 100% fue retirado previo al proceso de delaminación EVA: No reportado; una parte permaneció adherido a las celdas solares.
Pureza de los elementos	Vidrio: No reportado. Sin embargo, entre los tamaños de partícula de 0.3 y 0.08 mm se recupera con 100% Celda solar: No reportado. Sin embargo, entre los tamaños de partícula menores a 0.08 mm se recupera con 100% Metales: No reportado. Sin embargo, entre los tamaños de partícula menores a 0.08 mm se recupera con 100% EVA y Tedlar: No reportado. En los tamaños de partícula	Vidrio: No reportado; aumentó la contaminación superficial de plata, cobre y plomo posterior al tratamiento térmico Celda solar: No reportado; aumentó la concentración de plata, plomo, cobre y estaño Metales: No reportado; se tuvo mayor contenido de plata, pero un menor contenido de plomo y estaño Tedlar: ≈ 99%	Vidrio: ≈ 98.69%; permanecieron restos de EVA adheridos Celda solar: No reportado; se obtuvo con baja pureza por la adhesión del EVA Metales: ≈ 96%; permanecieron en la celda solar por el EVA adherido Tedlar: 98% EVA: Una parte se degradó y la restante permaneció adherida a las celdas

	mayores a 1 mm recuperado con 100%		
Materiales recuperados	Vidrio fragmentado con impurezas, mezcla de polvo de silicio, metales, vidrio y polímeros	Vidrio intacto o roto, celdas solares rotas o ininterrumpidas y cintas de cobre	Vidrio intacto o roto, celdas solares rotas o ininterrumpidas, cintas de cobre y polímero.
Ventajas	Duración: ≈ 3 a 6 minutos Consumo energético: ≈ 2.2 kWh/m^2 Rendimiento: ≈ 3,000 – 8,000 ton/año, fácilmente escalable. Contaminación ambiental baja Proceso utilizado por la mayor parte de las plantas de reciclaje.	Duración: ≈ 30 min a 2 horas Consumo energético: ≈ 25 kWh/m^2 Rendimiento: ≈ 3,000 ton/año Contaminación ambiental alta, consistente en CO, CO_2, COVs, benceno, entre otros. Proceso que permite degradar completamente el EVA; está siendo implementado por las empresas europeas de reciclaje de alto valor.	Duración: ≈ 2 a 24 horas Consumo energético: > 25 kWh/m^2 (No especificado por los autores) Rendimiento: No identificado, ya que no posee viabilidad para ser aplicado a escala industrial Contaminación ambiental alta, por la emisión de gases o vapores nocivos Proceso que permite degradar el EVA.
Desventajas	Si no se complementa con otros procesos, solo permite recuperar elementos mayoritarios (vidrio y marco); se generan partículas finas que son tóxicas si se desechan en vertederos; requiere de un proceso adicional para eliminar el EVA o recuperar elementos minoritarios.	Proceso prolongado con elevado consumo de energía; emite gases nocivos para el medio ambiente y la salud; requiere un sistema de filtración y purificación de gases; rendimiento medio en el procesamiento; puede causar degradación, ruptura y defectos en las celdas solares recuperadas	Proceso muy prolongado y costoso; el EVA no se separa completamente del resto de los elementos; uso de reactivos tóxicos para la salud y el ambiente; muy bajo rendimiento de procesamiento; muy alto consumo de energía y productos químicos.

Elaboración propia con datos de (Cabrera Hernández, 2024: Dobra *et al*. 2022; Deng et al. 2019; Granata *et al.* 2014; Lovato *et al.* 2021; Sharma et al. 2019).

Maani *et al*. (2020), determinaron que el reciclaje, independientemente del proceso que se lleve a cabo, tiene mucho menor impacto que el proceso de fabricación de módulos fotovoltaicos. Para Riech *et al*. (2021), no es indispensable recuperar las celdas solares ininterrumpidas, sino que el reciclaje debería enfocarse en recuperar silicio para la producción de celdas solares. Xu *et al*. (2021), determinaron que recuperar celdas solares ininterrumpidas es un proceso complicado ya que, con un método de delaminación térmica, las celdas se someten a un estrés gaseoso por la descomposición del EVA, generando su ruptura. Hay que considerar que una de las principales razones por las que los módulos fotovoltaicos son retirados de operación es debido al daño mecánico que sufren durante su transporte o por una mala instalación, pues la ruptura de las celdas solares se relaciona con el daño que tenga el módulo, así como con los procesos de desmantelamiento aplicados (Strachala *et al*. 2017).

- ***Proceso de purificación del silicio***

El proceso de purificación se realiza para separar los elementos minoritarios recuperados en la fracción fina después del proceso de trituración, por medio de procesos de lixiviación para extraer los metales de forma selectiva (Wambach *et al*. 2024; Palden, 2021). Una solución de lixiviación se conforma de un agente de lixiviación, que reacciona con los sólidos metálicos para liberar iones metálicos, y un solvente, que disuelve los iones metálicos para que permanezcan en la solución. En la actualidad,

la mayor parte de los procesos de lixiviación se realizan a través de soluciones ácidas minerales (con ácidos inorgánicos), utilizando agua como solvente (Palden, 2021).

Una vez delaminado el módulo y separadas las fracciones finas y gruesas, se utilizan soluciones químicas para realizar una lixiviación selectiva de los metales, tomando en cuenta las propiedades químicas de los componentes de las celdas solares. En la Tabla 4, se muestran algunos procesos para la purificación del silicio.

Tabla 4. Procesos para la recuperación de silicio, soluciones utilizadas y resultados obtenidos.

Método	Solución	Resultado	Material recuperado [%]	Pureza de elementos recuperados [%]
Reciclaje de obleas c-Si (Shin *et al.* 2017)	Ácido nítrico (HNO_3) al 60% durante 5 min.	Disolución del electrodo de plata	100% de oblea de silicio	98 – 99 %
	Hidróxido de potasio (KOH) al 45% durante 8 min.	Disolución del electrodo de aluminio		
	Pasta de grabado con ácido fosfórico (H_3PO_4) a 400°C + inmersión en solución de hidróxido de potasio (KOH) al 0.05%	Disolución de capa antirreflejante y unión n-p		
Separación de materiales en el proceso de reciclaje (Riech *et al.* 2021)	Ácido nítrico (HNO_3) al 70% + Ácido fluorhídrico (HF) al 40% durante 24 horas en una porción 10:1	Disolución de capa antirreflejante, unión n-p y metales, que permanecieron en la solución	90% de silicio en polvo	98 – 99 %
Reciclaje de silicio puro y otros metales (Punathil *et al.* 2021)	Hidróxido de sodio (NaOH) 10 M a 63°C durante 5 min.	Lixiviación del electrodo el aluminio	No especificado por el autor	99% de silicio. El resto de los mentales permanecieron en la solución de lixiviación
	Ácido nítrico (HNO_3) 6M a 70°C durante 5 min.	Lixiviación del electrodo de plata y plomo		
	Ácido fosfórico (H_3PO_4) al 90% a 70°C durante 45 min.	Disolución de capa antirreflejante		

Elaboración propia con datos de (Cabrera Hernández, 2024: Shin et al. 2017; Riech et al. 2021; Luo et al. 2021; Punathil et al. 2021).

En la Tabla 5 se muestran algunas soluciones de lixiviación y grabado químico identificadas a través de los procesos estudiados, su uso, así como su impacto ambiental y a la salud.

Tabla 5. Tabla comparativa de las soluciones utilizadas en el proceso de purificación de las obleas de silicio.

Solución	Uso	Impacto ambiental	Impacto a la salud
Ácido nítrico (HNO_3)	Permite lixiviar el electrodo frontal de plata.	Contribuye a la acidificación de cuerpos de agua, y a la deposición de lluvia ácida.	Puede causar quemaduras graves e irritación en vías respiratorias si se inhalan sus humos.
Hidróxido de potasio (KOH)	Permite disolver el electrodo posterior de aluminio.	Contribuye a la modificación del pH de cuerpos de agua, produciendo una toxicidad moderada.	Puede causar quemaduras químicas graves, irritación en vías respiratorias si se inhalan sus humos.
Hidróxido de sodio (NaOH)	Permite disolver el electrodo posterior de aluminio y el silicio triturado.	Contribuye a la modificación del pH de cuerpos de agua en su forma no diluida.	Puede causar quemaduras químicas graves, irritación en vías respiratorias si se inhalan sus humos.
Ácido fluorhídrico (HF)	Permite disolver la capa antirreflejante y la unión n-p de celdas solares.	Es tóxico y corrosivo, causa daño severo a organismos vegetales y acuáticos; posee alto potencial bioacumulativo.	Puede causar quemaduras químicas profundas que pueden dañar los tejidos y huesos, puede ser mortal si se inhalan sus humos.
Ácido fosfórico (H_3PO_4)	Permite disolver la capa antirreflejante y el emisor.	Es biodegradable, pero grandes cantidades pueden afectar la vida acuática, causando un crecimiento excesivo de algas.	Puede causar irritación en la piel y vías respiratorias. Es menos corrosivo que otros ácidos.

Elaboración propia con datos de (Wang et al. 2024; Sistema globalmente armonizado de clasificación y etiquetado de productos químicos, s.f.; ISQUISA Solución y logística a tu favor, s.f.; Hoja de seguridad de II Hidróxido de solio, s.f.; Ácido clorhídrico, s.f.; Hojas de datos de seguridad Karal, s.f.; Hoja de datos de seguridad Karal, 2022; Hoja de datos de seguridad AFIPA, s.f.).

Huang *et al.* (2017), Deng *et al*. (2022) y Faircloth *et al*. (2019), identificaron que una solución de ácido nítrico (HNO_3) permite disolver los metales de la celda solar, ya que, a escala industrial, se utiliza para grabar y limpiar metales (Sistema globalmente armonizado de clasificación y etiquetado de productos químicos, s.f.). Tomando en cuenta esto, la lixiviación de las partículas metálicas en una solución de HNO_3 permitirá separar los fragmentos de silicio del resto de los metales, recuperándolo con una baja contaminación.

En la mayor parte de los procesos de reciclaje de alto valor se hace uso de ácido nítrico (HNO_3) como sustancia de lixiviación, sin embargo, es altamente corrosivo al entrar en contacto con metales, generando gases nocivos conocidos como óxidos de nitrógeno (NOx) y, a su vez, generan un impacto negativo en el medio ambiente, provocando la formación de lluvia ácida. Por ello, es necesario buscar alternativas más amigables con el medio ambiente y menos peligrosas para la salud humana. Para ello, se propone la investigación científica para la búsqueda de alternativas más respetuosas y amigables con el medio ambiente haciendo uso de solventes verdes, los cuales pueden ser ácidos orgánicos, puesto que no son tóxicos y son biodegradables, además de que, con su uso, se aplican principios de química verde.

Las soluciones de lixiviación minerales pueden ser reemplazadas por lixiviantes orgánicos, pudiendo ser: ácidos minerales combinados con disolventes orgánicos, ácidos orgánicos, agentes quelantes, entre otros. Permitiendo reemplazar las soluciones de lixiviación minerales utilizadas para la purificación de silicio y metales dentro de un proceso más amigable con el medio ambiente. Para lo cual, es importante realizar pruebas de solventes verdes en los procesos de purificación de los elementos minoritarios, comprobando su selectividad, viabilidad y escalabilidad con una mínima contaminación ambiental, promoviendo la disminución de residuos peligrosos.

Finalmente, es necesario llevar a cabo la recuperación de los metales que permanecen dentro de la solución de lixiviación, teniendo 2 posibles rutas para su recuperación (Cabrera Hernández, 2024):

1. Precipitación química: Se agregan reactivos químicos a la solución de lixiviación, permitiendo precipitar metales en forma de hidróxidos metálicos. Los hidróxidos metálicos pueden ser recuperados con purezas de entre 80 – 95 %.
2. Electroobtención o electrólisis: Se hace circular una corriente eléctrica de baja intensidad a través de dos electrodos sumergidos en la solución de lixiviación, la cual se mantiene en agitación constante, permitiendo recuperar metales con una pureza de entre el 95 – 99 %.

Algunas empresas como Tialpi, ROSI y LuxChemtech han desarrollado e implementado procesos de electrólisis para recuperar los metales que han sido lixiviados después de la delaminación del módulo fotovoltaico (Cabrera Hernández, 2024; Wambach *et al.* 2024).

- ***Reutilización de elementos recuperados en el proceso de reciclaje***

Los marcos de aluminio pueden ser reciclados por empresas de reciclaje de aluminio, ya estos no son sometidos a un proceso, puesto que son retirados en conjunto con la caja de conexión del módulo fotovoltaico. Por ello, podrán ser sometidos a procesos para la formación de lingotes en la producción de aluminio secundario (Itodo *et al.* 2024; Trivedi *et al.* 2023). Por su parte, las cajas de conexiones contienen componentes electrónicos que pueden ser recuperados y reutilizados [Itodo *et al.* 2024; Latunussa *et al.* 2016; Trivedi *et al.* 2023).

El vidrio puede reutilizarse para fabricar azulejo de vidrio, utilizarse como agente abrasivo en limpieza o dentro de sistemas de filtración de agua (Itodo *et al.* 2024). El encapsulante EVA y la capa posterior de Tedlar pueden emplearse para la fabricación de nuevas láminas de EVA, o bien, como materiales para aislamiento en la construcción, fabricación de pisos y colchonetas (Itodo *et al.* 2024).

El silicio, al ser recuperado como silicio de grado metalúrgico (98 – 99 % de pureza) puede reintroducirse para la fabricación de nuevas celdas solares después de un proceso de purificación para obtener silicio de grado solar (4 – 6N), o bien, utilizarse para la fabricación de carburo de silicio. La plata recuperada puede reintroducirse en la industria electrónica, joyería o dentro del sector de la fotografía. El cobre puede emplearse para la formación de aleaciones de cobre o ser reciclado. El plomo puede ser utilizado en la industria de fabricación de baterías de plomo-ácido, para la formación de aleaciones o como soldadura en los módulos fotovoltaicos o componentes electrónicos (Cabrera Hernández, 2024; Itodo *et al.* 2024).

Conclusiones

El reciclaje de módulos fotovoltaicos, a nivel mundial, es un tema que está siendo cada vez más importante dentro de la industria solar fotovoltaica. Países como China, Japón, Italia y Alemania han iniciado con la fabricación y comercialización de equipo o plantas de reciclaje con procesos mecánicos, como apoyo a empresas y organizaciones de diferentes países para implementar y promover estas prácticas a escala industrial, pero es importante considerar que se trata de procesos de reciclaje de bajo valor. En la actualidad, se busca que las empresas de reciclaje implementen procesos de reciclaje de alto valor, permitiendo dar un valor agregado a la industria solar fotovoltaica, ya

que, los materiales recuperados pueden ser reutilizados para la fabricación de nuevos módulos fotovoltaicos después de recibir un tratamiento adecuado.

Después de realizar un análisis comparativo de los métodos de reciclaje identificados, se determinó que un proceso de delaminación mecánico es una de las tecnologías que más abarca el mercado de reciclaje mundial por ser un proceso rentable, técnicamente factible y fácil de escalar, con alta capacidad de procesamiento y de bajo consumo energético, ya que puede tener un procesamiento de entre 10,000 a 50,000 toneladas de manera anual con un consumo de hasta 60 kWh/ton, mientras que el proceso de reciclaje térmico tiene un procesamiento de unas 1,000 – 3,00 toneladas de módulos al año con un consumo energético de entre 60 – 136 kWh/ton. Este proceso puede ser complementado con un proceso de purificación químico, así como un proceso de recuperación de metales, para recuperar los metales contenidos en la solución de lixiviación con una pureza mayor al 95%. Tomando en cuenta el impacto ambiental y a la salud que genera el uso de sustancias de lixiviación minerales, es necesario promover la investigación y divulgación científica para el uso de solventes menos dañinos (química verde), los cuales permitirán reducir el impacto ambiental del proceso de reciclaje químico, a la vez que se promueven el desarrollo de procesos más limpios y amigables con el medio ambiente.

Bibliografía

Ácido clorhídrico. ANIQ - Home. Recuperado 25 de agosto de 2025, de https://aniq.org.mx/pqta/pdf/HDMS%20Acido%20Clorhidrico%20El%20Salto.pdf

Cabrera Hernández, M. (2024). Análisis comparativo de los métodos de reciclaje de módulos solares fotovoltaicos de silicio mono y policristalino para realizar una propuesta de aplicación en Puebla. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla: Facultad de Ciencias de la Electrónica.

Camargo, P. S. S., Domingues, A. da S., Palomero, J. P. G., Kasper, A. C., Dias, P. R., & Veit, H. M. (2021). PHOTOVOLTAIC MODULE RECYCLING: THERMAL TREATMENT TO DEGRADE POLYMERS AND CONCENTRATE VALUABLE METALS. Detritus, 16, 48–62. Recuperado 03 de agosto de 2025 de https://doi.org/10.31025/2611-4135/2021.15119

Casas Rueda, A. Z. & Cordero Castellanos, B. M. (2023). Tecnologías y métodos para el reciclaje de materiales de paneles fotovoltaicos basados en silicio cristalino. Universidad Industrial de Santander: Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.

Collins, K. F. (2024). A Comparative Analysis Of Technology And Policy Of High-Value PV Recycling: The United States Versus The European Union. Appalachian State University. Thesis. Recuperado 18 de mayo 2026 de: https://doi.org/10.71889/5fylantbak.29868479.v1

Deng, R., Chang, N.L., Ouyang, Z., & Chong, C. M. (2019). A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling. Recuperado 03 de agosto de 2025 de https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119302321

Deng, R., Zhuo, Y. & Shen, Y. (2022). Recent progress in silicon photovoltaic module recycling processes. Resour., Conservation Recycling, vol. 187, p.

106612. Recuperado 03 de agosto de 2025 de https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106612

Dobra T, Vollprecht D, Pomberger R. Thermal delamination of end-of-life crystalline silicon photovoltaic modules. Waste Manag Res. 2022 Jan;40(1):96-103. doi: 10.1177/0734242X211038184. Epub 2021 Aug 19. PMID: 34407715; PMCID: PMC8832565.

Éléonore de Roissart (2020). Research and development of a pilot-scale recycling process for photovoltaic panels. Engineering Sciences [physics]. ⟨dumas-03609148⟩

Faircloth, C.C., Wagner, K.H., Woodward, K.E., Rakkwamsuk, P., Gheewala, S.H. (2019). The environmental and economic impacts of photovoltaic waste management in Thailand, Resources, Conservation and Recycling, Volume 143, Pages 260-272, ISSN 0921-3449. Recuperado 03 de agosto de 2025 de https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.01.008.

Francovigh, G. (2023). Inventario Asolmex: la capacidad fotovoltaica en México alcanzó los 10,479 MW - Energía Estratégica. Recuperado 03 de agosto de 2025 de https://www.energiaestrategica.com/inventario-asolmex-lacapacidad-fotovoltaica-en-mexico-alcanzo-los-10479-mw/

Granata, G., Pagnanelli, F., Moscardini, E., Havlik, T., Toro, L. (2014). Recycling of photovoltaic panels by physical operations. Solar Energy Materials and Solar Cells. Recuperado 14 de mayo de 2026 de 123. 239–248. 10.1016/j.solmat.2014.01.012.

Hoja de datos de seguridad. AFIPA - AFIPA. Recuperado 25 de agosto de 2025 de https://www.afipa.cl/HDSMelipilla/Acido%20Fosforico%20-%2000233.pdf

HOJA DE SEGURIDAD II HIDROXIDO DE SODIO. Inicio - Facultad de Química. Recuperado 25 de agosto de 2025 de https://quimica.unam.mx/wp-content/uploads/2008/05/2hsnaoh.pdf

Hoja de datos de seguridad. Karal - Reactivos Analíticos. Recuperado 25 de agosto de 2025 de https://www.karal.com.mx/admin/seguridad/uploads/%20ÁCIDO%20FLUORHÍDRICO%20Solución%20al%205%200777.pdf

Hoja de datos de seguridad. Koura Global | Global Leader | Largest Fluorspar Manufacturer. Recuperado 25 de agosto de 2025 de https://www.kouraglobal.com/wp-content/uploads/FINAL-Aqueous-HF-v2-NAFormat-4-April-2022-Spanish.pdf

Huang, W.-H., Shin, W. J., Wang, L., Sun, W.-C. y Tao, M. (2017). Strategy and technology to recycle wafer silicon solar modules. Sol. Energy, vol. 144, pp. 22–31. Recuperado 15 de agosto de 2025 de https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.001

Inguanzo Saucedo, J., de la Torres Moya, J. A., Gómez Morales, L. & Inguanzo Saucedo, O. (2016). Caracterización estructural t eléctrica de celdas Fotovoltaicas de doble y triple capa. Centro de investigación en materiales avanzados: Departamento de estudios de posgrado

In-Data & RIGK. (2020). *Alternativas de tratamiento de módulos fotovoltaicos*

luego de su vida útil. Economía Circular. Recuperado 8 de mayo de 2026, de: https://economiacircular.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/06/2-Informe-2.pdf

IRENA (2024), Renewable capacity statistics 2024, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

ISQUISA Solución y logística a tu favor. (s.f.) HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD Hidróxido de Potasio 45%. ISQUISA | EXPERIENCIA DE VALOR AGREGADO. Recuperado 25 de agosto de 2025 de https://isquisa.com/assets/files/HDSLISTOS/HIDROXIDOS/HDSHidróxido%20de%20Potasio%2045_.pdf

Itodo, A., Onche, E., Ofoegbu, O., Ajakaye, D., Japheth, L. (2024). RECYCLING OF SOLAR PANEL CELLS: PAST, PRESENT AND FUTURE. International Journal of Science and Research (IJSR). 11. 11-30. 10.5281/zenodo.10577851. Recuperado 16 de mayo de 2026 de https://www.researchgate.net/publication/377874931_RECYCLING_OF_SOLAR_PANEL_CELLS_PAST_PRESENT_AND_FUTURE/citation/download

Latuussa, C., Ardente, F., Blengini, G.A., Mancini, L., Pennington, D. (2016). Analysis of material recovery from silicon photovoltaic panels. JRC Publications Repository. Recuperado 18 de agosto de 2025 de doi:10.2788/786252

Lovato, E., Donato L., Lopes, P., Tanabe, E., Bertuol, D. (2021). Application of supercritical CO2 for delaminating photovoltaic panels to recover valuable materials, Journal of CO2 Utilization, Volume 46, 101477, ISSN 2212-9820, https://doi.org/10.1016/j.jcou.2021.101477. Recuperado 20 de agosto de 2025 de https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212982021000445

Luo, M., Liu, F., Zhou, Z., Jiang, L., Jia, M., Lai, Y., Li, J., Zhang, Z. (2021). A comprehensive hydrometallurgical recycling approach for the environmental impact mitigation of EoL solar cells. J. Environmental Chem. Eng., vol. 9, n.º 6, p. 106830. Recuperado 18 de agosto de 2025 de https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106830

Maani, T., Celik, I., Heben, M.J., Ellingson, R.J., Apul, D. (2020). Environmental impacts of recycling crystalline silicon (c-SI) and cadmium telluride (CDTE) solar panels, Science of The Total Environment, Volume 735, 138827, ISSN 0048-9697. Recuperado 18 de agosto de 2025 de https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138827

Palden, T., Binnemans, K., & Regadío, M. (2021). Organic lixiviants for metal recovery from industrial process residues. Degree of Doctor of Science. Faculty of science, Department of chemistry, molecular desing & synthesis.

Punathil, L., Mohanasundaram, K., Tamilselavan, K.S., Sathyamurthy, R. y Chamkha, J. (2021). Recovery of Pure Silicon and Other Materials from Disposed Solar Cells. Wiley Online Library. Recuperado 20 de agosto de 2025 de https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2021/5530213

Reyes, C. (2013). La reutilización de los Paneles Fotovoltaicos. Academia.edu.

Recuperado 20 de agosto de 2025 de https://www.academia.edu/28642300/La_reutilizacion_de_los_Paneles_Fotovoltaicos

Riech I., Montalvo, C.C., Wittersheim, L., Vallejos Giácoman, G., González Sánchez, A., Gamboa Loira, C., Acosta M., Méndez Gamboa, J. (2021). Experimental Methodology for the Separation Materials in the Recycling Process of Silicon Photovoltaic Panels. Materials, vol. 14, n.º 3, p. 581. Recuperado 18 de agosto de 2025 de https://doi.org/10.3390/ma14030581

Rodríguez Suárez, J.S., Espinoza Navarrete, E., Rosenbuch, J., Ortega Navarro, H.O., Martínez Fernández, M., Cedano Villavicencio, K.G., Armenta, M.M. (2017). La industria solar fotovoltaica y fototérmica en México. PROMEXICO. Recuperado 15 de agosto de 2025 de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/428621/La_industria_solar_fv_y_ft_en_M_xico-compressed.pdf.

Sharma A., Pandey S. y Kolhe M. (2019). Global review of policies & guidelines for recycling of solar PV modules. Int. J. Smart Grid Clean Energy, pp. 597–610. Recuperado 20 de agosto de 2025 de https://doi.org/10.12720/sgce.8.5.597-610

Shin, J., Park, J. y Park, N. (2017). A method to recycle silicon wafer from end-of-life photovoltaic module and solar panels by using recycled silicon wafers. Sol. Energy Mater. Sol. Cells, vol. 162, pp. 1–6. Recuperado 20 de agosto de 2025 de https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.12.038

Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos. (s.f.) Ficha de datos de seguridad de materiales: Ácido Nítrico. CIAFA. Recuperado 25 de agosto de 2025 de https://www.ciafa.org.ar/files/t8nqSMsoIxouFBASKVgK1UinhYtE1aaeCY7UkvV2.pdf

Späth M., Wieclawska S., Sommeling P., Lenzmann F. (2022) Balancing Costs and Revenues for Recycling End-of-life PV Panels in the Netherlands. Recuperado 20 de agosto de 2025 de https://publications.tno.nl/publication/34640523/crl8a6/TNO-2022-R10860.pdf.

Strachala, D., Hylský, J., Vanek, J., Fafilek, G. (2017). Methods for recycling photovoltaic modules and their impact on environment and raw material extraction. Acta Montan. Slovaca, vol. 22, n.º 3, pp. 257–269. Recuperado 20 de agosto de 2025 de https://www.researchgate.net/publication/322043679_Methods_for_recycling_photovoltaic_modules_and_their_impact_on_environment_and_raw_material_extraction

Suárez, E. (2023). Reciclaje de paneles fotovoltaicos. Trabajo de fin de máster, Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado 18 de mayo de 2026 de https://oa.upm.es/75365/1/TFM_EMMA_SUAREZ_SOTO_JOVE.pdf

Trivedi, H., Meshram, A., Gupta R. (2023). Recycling of photovoltaic modules for recovery and repurposing of materials, Journal of Environmental Chemical Engineering, Volume 11, Issue 2, 109501, ISSN 2213-3437, https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109501. Recuperado 20 de agosto de

2025 de https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343723002403

Universidad de Antofagasta. (2022). Vigilancia Tecnológica. Reciclaje De Paneles Solares. Recuperado 23 de agosto de 2025 de https://energia.gob.cl/sites/default/files/informe_final_recuperacion_de_materiales_-_vt_16.05.22.pdf#:~:text=En%20este%20informe%20se%20presenta%20la%20vigilancia%20tecnol%C3%B3gica,y%20la%20Organizaci%C3%B3n%20Mundial%20de%20la%20Propiedad%20Intelectual.

Universidad de la Laguna (2017). Estudio sobre las posibilidades de valorización de residuos de paneles fotovoltaicos. Recuperado 20 de mayo de 2026 de https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/5835/Estudio+sobre+las+posibilidades+de+valorizacion+de+residuos+de+paneles+fotovoltaicos.pdf?sequence=1

Usla, H. (2025, diciembre 18). *Así es Rafiqui, primera recicladora de paneles solares de México*. El Financiero. Recuperado 20 de mayo de 2026 de https://www.elfinanciero.com.mx/economia/2025/12/18/asi-es-rafiqui-primera-recicladora-de-paneles-solares-de-mexico/

Wambach K., Libby C. y Shaw S. (2024). Advances in Photovoltaic Module Recycling - Literature Review and Update to Emírical Life Cycle Inventory Data and Patent Review. Rep. IEA-PVPS. Recuperado 25 de agosto de 2025 de https://doi.org/10.69766/IPDB8111

Wang, O. & Ma, X. (2024). Innovating the recycling of silicon-based solar panels with an eco-friendly alkaline leaching process. Resour., Conservation Recycling, vol. 211, p. 107887. Recuperado 15 de agosto de 2025 de https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107887

Wang, X., Tian, X., Chen, X., Ren, L., Geng, C. (2022). A review of end-of-life crystalline silicon solar photovoltaic panel recycling technology, Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 248, 111976, ISSN 0927-0248. Recuperado 15 de agosto de 2025 de https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111976

Weckend S., Wade A., Heath G. (2016). End-of-life management: Solar photovoltaic panels. Photovoltaic Power Systems Programme, 1-100. Recuperado 15 de agosto de 2025 de https://iea-pvps.org/key-topics/irena-iea-pvps-end-of-life-solar-pv-panels-2016/.

Xu, X., Lai, D., Wang, G., & Wang, Y. (2021). Nondestructive silicon wafer recovery by a novel method of solvothermal swelling coupled with thermal decomposition. ScienceDirect. Recuperado 20 de agosto de 2025 de https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894721010445

Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Modelos energéticos internacionales como base para el diseño de estrategias de transición energética en la Región Carbonífera de Coahuila

International energy models as a basis for designing energy transition strategies in the Carbonífera Region of Coahuila

Lucas-Rodríguez, C.[a], Torres-León, C.[b], Robles-Quintanilla, D.E.[c], Aguirre-Joya, J.A.[b]*

[a] Centro de Estudios e Investigaciones Interdisciplinarias de la Universidad Autónoma de Coahuila, C.P. 25280, Saltillo, Coahuila. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-5249-4470.
[b] Centro de Investigación y Jardín Etnobiológico de la Universidad Autónoma de Coahuila, C.P. 27480, Viesca, Coahuila. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1614-5701, https://orcid.org/0000-0002-6298-4207*.
[c] Escuela Superior de Ingeniería Lic. Adolfo López Mateos de la Universidad Autónoma de Coahuila, C.P. 26830, Nueva Rosita, Coahuila. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-2168-2063.
christian.lucas@uadec.edu.mx; ctorresleon@uadec.edu.mx; drobles@uadec.edu.mx; jorge_aguirre@uadec.edu.mx*

Innovación tecnológica: Adopción de tecnologías como herramientas para transformar el modelo energético actual.

Área de aplicación industrial: Desarrollo de cadenas de valor en energías limpias, reconversión de infraestructura minera.

Recibido: 12 noviembre 2025
Aceptado: 22 abril 2026

Abstract

Energy acts as a universal medium of exchange and has long been a determining factor in humanity's cultural, economic, and technological evolution. Its generation remains essential for regional development; however, dependence on fossil fuels carries far-reaching environmental consequences. Within this framework, the Carbonífera Region of Coahuila stands out as a significant case study, as it accounts for approximately 98% of Mexico's coal production (WWF, 2021) and continues to rely heavily on this resource for its economic and industrial activities. The objective of this study is to identify key elements for constructing energy transition scenarios that can guide a just and sustainable transformation of the region's energy system. To achieve this, a comparative analysis of international experiences was conducted, using the transition models implemented in Germany, China, and Spain as references. The methodological approach considered variables associated with social perception, local governance, and regulatory frameworks. These variables supported the development of a Strengths, Weaknesses,

Opportunities, and Threats (SWOT) matrix and a Balanced Scorecard (BSC) for assessing transition readiness. The results highlight Mexico's primary weaknesses and opportunities in comparison with countries that have achieved significant progress in their energy transitions. Based on these findings, the study provides strategic recommendations aimed at promoting a fair, inclusive, and sustainable energy transition in the Carbonífera Region of Coahuila.

Keywords: Coal, BSC, Energy transition, SWOT, Fossil fuels.

Resumen

La energía funciona como un medio de intercambio universal y ha constituido un factor decisivo en los principales procesos culturales, económicos y tecnológicos de la humanidad. Su generación es indispensable para el desarrollo de cualquier región, aunque la dependencia de los combustibles fósiles implica consecuencias ambientales de gran magnitud. En este contexto, la Región Carbonífera de Coahuila representa un caso de estudio relevante, ya que concentra alrededor del 98% de la producción de carbón en México (WWF, 2021) y mantiene una fuerte dependencia de este recurso para su actividad económica e industrial. El objetivo del presente trabajo es identificar puntos clave para la construcción de escenarios energéticos en dicha región que permitan orientar una transición justa. Para ello se realizó un análisis comparativo de experiencias internacionales, tomando como referencia los modelos de transición energética implementados en Alemania, China y España. El estudio incluyó variables relacionadas con el entendimiento social, las políticas locales y el marco regulatorio, lo que permitió elaborar una matriz de fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas (FODA), que sirvió como insumo metodológico para la elaboración de un cuadro de mando integral (CMI). Del análisis se destacan las principales carencias y oportunidades de México frente a países que han logrado avances significativos, y ofrecen recomendaciones para impulsar una transición energética justa en la Región Carbonífera de Coahuila.

Palabras clave: Carbón, Combustibles fósiles, CMI, matriz FODA, Transición energética.

1. INTRODUCCIÓN

La Región Carbonífera de Coahuila, integrada por los municipios de Juárez, Melchor Múzquiz, Progreso, Sabinas y San Juan de Sabinas, concentra el 98% de la producción nacional de carbón mineral (WWF, 2021) y constituye un eje histórico del desarrollo energético del país. Sin embargo, la dependencia de este recurso ha generado vulnerabilidades económicas, sociales y ambientales, evidenciadas en la crisis de 2019 y en la drástica caída de la producción entre 2019 y 2023. Al mismo tiempo, México enfrenta el reto de aprovechar su alto potencial en energías renovables (solar, eólica, hidroeléctrica y geotérmica) frente a un escenario internacional donde países como Alemania, España y China han logrado consolidar estrategias de transición energética mediante innovación tecnológica, políticas de apoyo y diversificación productiva.

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar los escenarios internacionales de transición energética y utilizarlos como referencia metodológica para construir una matriz FODA y en

consecuencia un Cuadro de Mando Integral (CMI) aplicados a la Región Carbonífera de Coahuila. De esta manera, se busca identificar fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas reales de la región, y traducirlas en indicadores económicos, operativos, sociales y de innovación que orienten rutas estratégicas hacia una transición energética justa, situada y sostenible.

Dentro de la Cuenca de Sabinas se localizan las subcuencas de Río Escondido y Sabinas, las cuales se subdividen en ocho unidades carboníferas. Se estima que el volumen potencial de reservas de carbón mineral en México alcanza los 998 millones de toneladas (Gobierno de México, 2025). En este contexto, la Cuenca de Sabinas se caracteriza por la presencia de dos tipos predominantes de carbón: el sub-bituminoso, adecuado para la producción de coque metalúrgico, y el sub-bituminoso tipo C, de alta volatilidad, utilizado principalmente en la generación termoeléctrica. En el año 2020, la distribución de la producción nacional fue de 39% para carbón térmico, 47% para carbón coquizable y 14% para carbón lavado (WWF, 2021).

La actividad minera en esta región es desarrollada por alrededor de cincuenta empresas, de las cuales seis pertenecen al segmento de gran minería, mientras que el resto corresponde a productores pequeños y medianos. La compañía mayor relevancia ha sido Altos Hornos de México (AHMSA), que opera a través de sus filiales Minera Río Escondido (MICARE) y Minerales Monclova (MIMOSA), gestionando minas, tajos, plantas de lavado y unidades coquizadoras hasta el año 2021 (WWF, 2021). A pesar de que la minería del carbón constituye el principal eje económico de los municipios que integran la Región Carbonífera, esta dependencia ha generado una estructura productiva vulnerable, caracterizada por condiciones laborales precarias y riesgos ambientales significativos (Ramírez, 2025).

A finales de 2019, la Región Carbonífera enfrentó una crisis económica severa, derivada de la decisión del Centro Nacional de Control de Energía (CENACE) de cancelar los contratos de adquisición de carbón por parte de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Esta medida buscaba evitar prácticas de reventa y concentración del mercado por parte de grandes productores, lo que había provocado un incremento anormal en el precio del mineral. Aunque esta coyuntura reafirmó el papel estratégico del carbón en el desarrollo regional, también evidenció problemáticas estructurales persistentes, tales como la pérdida de empleos, la inestabilidad laboral, la negligencia industrial y la insuficiencia de regulación ambiental (Ramírez, 2025).

Como resultado de las condiciones previamente descritas, la producción de carbón en el estado de Coahuila experimentó una disminución significativa. Mientras que en 2019 se registró un volumen de 6,175,726 toneladas (T), para el año 2023 la cifra descendió drásticamente a 477,904.46 (T), lo que representa una reducción del 92.26% en comparación con el nivel alcanzado cuatro años antes (SGM, 2025).

Este pronunciado descenso no solo evidencia una reconfiguración en las dinámicas del sector energético, sino que también refleja una tendencia creciente hacia la adopción de fuentes más sostenibles. En este contexto, adquiere relevancia el avance de la generación eléctrica mediante energías renovables en México, lo cual señala una transformación estructural en la matriz energética nacional orientada a disminuir la dependencia de los combustibles fósiles, particularmente del carbón.

La generación eléctrica renovable en el país incluye diversas tecnologías: hidroeléctrica, solar fotovoltaica, eoloeléctrica, geotermoeléctrica y bioenergía, esta última basada en el aprovechamiento de residuos orgánicos como biomasa, bagazo de caña y licor negro. En 2022, la generación neta de electricidad proveniente de fuentes limpias alcanzó los 82,983.58 (GWh) Entre 2018 y 2022, las tecnologías fotovoltaica, eólica e hidroeléctrica registraron incrementos del 533.4%, 65.1% y 10.3%, respectivamente (SENER, 2023).

En el plano regional, el Atlas Nacional de Zonas con Alto Potencial de Energías Limpias publicado en 2023 identifica que Coahuila cuenta con una capacidad técnica para instalar hasta 22,500 (MW) en proyectos eólicos y 9,814 (MW) en sistemas solares fotovoltaicos.

A nivel nacional, el potencial solar supera los 5,000 (TWh/año), impulsado por niveles de irradiación superiores a 5.5 (kWh/m²/día) en estados como Sonora y Chihuahua. En cuanto a energía eólica, México dispone de un potencial técnico superior a 50 (GW), concentrado principalmente en el Istmo de Tehuantepec, donde los factores de planta exceden el 40% (Flores, 2023). En el ámbito geotérmico, el país ocupa el sexto lugar mundial en capacidad instalada, con más de 1 (GW), y un potencial estimado de hasta 13.4 (GW) (Romero, 2021). No obstante, la capacidad instalada total en energías renovables apenas supera los 30 GW, lo que representa cerca del 28% de la generación eléctrica nacional. Esta disparidad entre el potencial técnico y su aprovechamiento efectivo se atribuye a obstáculos regulatorios, limitaciones en inversión y conflictos sociales.

En el contexto internacional, España cuenta con más de 70 (GW) de capacidad instalada en energías renovables, distribuidos en 40 (GW) de generación eólica y 25 (GW) solar fotovoltaica. Su irradiación solar promedio oscila entre 4.5 y 5.0 (kWh/m²/día), y su potencial eólico supera los 100 (GW) (IEA, 2025). Alemania, a pesar de tener una irradiación menor (3.0–3.5 kWh/m²/día), ha logrado instalar más de 70 (GW) en solar y 60 (GW) en eólica, gracias a políticas de subsidios y avances tecnológicos (Fraunhofer ISE, 2025). China lidera el panorama global con más de 430 GW en solar y 440 (GW) en eólica, y un potencial técnico combinado superior a 2,000 (GW) (Guo X., 2024).

La diferencia fundamental entre estos países y México radica en la composición de la matriz energética, el nivel de participación de las fuentes renovables, el marco regulatorio vigente y las estrategias impulsadas para fomentar la innovación tecnológica, entre otros rubros. Aunque México dispone de condiciones naturales excepcionales para el desarrollo de energías renovables, naciones como China han logrado capitalizar su potencial económico mediante estrategias de innovación tecnológica e industrial (Tenorio Gamboa, 2025).

Frente a este escenario, el futuro energético de regiones como la Carbonífera de Coahuila permanece incierto. Si bien México ha adoptado una política energética proactiva en la última década, incorporando fuentes renovables en su modelo de suministro, se requiere una transformación profunda que permita reducir gradualmente el uso de combustibles fósiles. Esta transición es clave para generar beneficios estructurales en territorios cuya economía depende en gran medida de estos recursos.

2. ENERGIAS RENOVABLES: CARACTERÍSTICAS.

Las energías renovables son aquellas fuentes que se obtienen de recursos naturales prácticamente inagotables o que se regeneran

a una velocidad superior a la de su consumo (Allub, 2024). A diferencia de las fuentes tradicionales, como el carbón, el petróleo o el gas natural, que son finitas y responsables de emisiones significativas de gases de efecto invernadero (GEI), las energías renovables se caracterizan por ser limpias, sostenibles y fundamentales para la descarbonización (Bortz, 2022).

A continuación, se describen algunos de los tipos más comunes de energías renovables:

Energía solar: La energía solar se basa en el aprovechamiento de la radiación proveniente del sol, ya sea para la generación eléctrica mediante sistemas fotovoltaicos o para la producción de calor a través de colectores térmicos. Esta tecnología representa una de las alternativas renovables más accesibles y adaptables, especialmente en zonas con alta irradiación solar, como ocurre en amplias regiones de América Latina (Molinari, 2024).

Energía eólica: La energía eólica se origina del desplazamiento del aire, cuya energía cinética es transformada en electricidad mediante aerogeneradores. Esta fuente renovable ha mostrado uno de los ritmos de expansión más dinámicos a nivel global, con avances notables en países latinoamericanos como Brasil y México (Schutte, 2023).

Energía hidroeléctrica: La generación hidroeléctrica se fundamenta en el uso de la energía potencial y cinética del agua en movimiento, principalmente en cauces fluviales y embalses. América Latina cuenta con una trayectoria consolidada en esta modalidad, destacando infraestructuras de gran escala en naciones como Brasil y Paraguay, que aportan de manera significativa a la configuración energética regional (García, 2024).

Energía de biomasa: La biomasa comprende el uso de materiales orgánicos, tanto vegetales como animales, para la producción de electricidad, calor o biocombustibles. Esta fuente incluye residuos provenientes de actividades agrícolas, forestales y urbanas, y constituye una alternativa viable para zonas rurales y sectores industriales con alta generación de desechos orgánicos (Carabio, 2023).

Energía geotérmica: se basa en el aprovechamiento del calor proveniente del interior terrestre, utilizado tanto para la generación de electricidad como para aplicaciones térmicas. Aunque su grado de desarrollo en América Latina aún es limitado, esta fuente renovable presenta un alto potencial en áreas volcánicas específicas de la región (Sepúlveda, 2024).

Cada una de estas fuentes renovables aporta ventajas importantes en términos de sostenibilidad ambiental y reducción de emisiones de gases contaminantes. La adopción masiva y coordinada de estas tecnologías es imprescindible para cumplir con los objetivos globales de mitigación del cambio climático y garantizar un desarrollo energético sostenible en la región (Banco de Desarrollo de América Latina y el Caribe, 2024).

3. MODELO ENERGETICO MEXICANO

El sector energético de México representa una base estratégica para el desarrollo económico y social del país, al integrar los procesos de gestión, conversión y uso eficiente de los recursos energéticos como pilares del crecimiento nacional. (Toledo, 2020).

Sector Eléctrico Nacional (SEN)

El sistema eléctrico nacional mexicano tiene sus antecedentes en el siglo XIX, cuando se implementaron los primeros sistemas de alumbrado público en la Ciudad de México.

No obstante, un punto de inflexión en su consolidación ocurrió en 1960, con la nacionalización del sector eléctrico. En ese momento, la Comisión Federal de Electricidad (CFE), como entidad paraestatal, asumió el control casi total de la generación, distribución y comercialización de energía eléctrica en el país (Montaño, 2021).

Desde entonces, el sistema eléctrico nacional adoptó una estructura centralizada, caracterizada por el dominio estatal en las actividades de generación, transmisión y distribución de energía. Esta configuración institucional facilitó la implementación de programas de electrificación rural y permitió una ampliación de la cobertura del servicio eléctrico durante la segunda mitad del siglo XX (Montaño, 2021).

En las últimas dos décadas, la demanda eléctrica en México ha experimentado un crecimiento significativo, duplicando sus niveles previos. Actualmente, más del 99% de la población cuenta con acceso al servicio eléctrico; sin embargo, el consumo per cápita continúa siendo moderado. Según el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN), elaborado por SENER en 2024, el consumo promedio por habitante en 2023 fue de 2,150 kilowatts-hora anuales. El Sistema Eléctrico Nacional (SEN) está conformado por cuatro subsistemas aislados: el Sistema Interconectado Nacional (SIN), el Sistema Eléctrico de Baja California (BC), el Sistema Eléctrico de Baja California Sur (BCS) y el Sistema Eléctrico Mulegé (SEM) (Toledo, 2020).

El SEN es un componente del sector energético que involucra la generación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica el cual hoy en día aún depende mayoritariamente de combustibles fósiles: la generación fósil aumentó en años recientes y en 2023 la producción térmica (principalmente ciclo combinado a gas) representó la mayor parte de la producción anual con alrededor de ~200 (TWh) generados por ciclos combinados y un total de generación eléctrica anual en el orden de ~340–352 (TWh) (Probst, 2024).

En cuanto a las modalidades actuales de generación eléctrica, el 57.2% de la capacidad instalada en México está constituida por plantas operadas directamente por la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Por su parte, los Productores Independientes de Energía (PIEs) representan el 17.5% del total, mientras que el 25.3% restante corresponde a generadores privados que participan mediante esquemas diversos, tales como autoabastecimiento, cogeneración eficiente, pequeña producción, exportación, generación para usos propios continuos, generación distribuida y sistemas rurales no conectados a la red nacional (SENER, 2022).

Recursos renovables

A nivel global, las fuentes renovables representaron el 14.45% de la matriz energética, mientras que en México su participación fue inferior en 4.45 puntos porcentuales, alcanzando únicamente el 10.00% de la oferta interna bruta nacional. En contraste, el carbón y sus derivados aportaron el 9.05% a nivel mundial, mientras que en el caso mexicano su contribución fue de apenas 1.90% (SENER, 2022).

Para el año 2022, México experimentó un crecimiento significativo en la capacidad instalada de generación eléctrica a partir de fuentes renovables, duplicando su volumen de 25,648 (MW) a 33,639 (MW) según datos de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA). Para este mismo año el país alcanzó una capacidad instalada total de 88 parques solares fotovoltaicos, 77 parques eólicos, cuatro instalaciones geotérmicas y 67 centrales hidroeléctricas en operación, reflejando un crecimiento sostenido en la

diversificación de su matriz renovable (IRENA, 2024).

El territorio nacional posee un alto potencial para el aprovechamiento de recursos renovables, lo que ha favorecido un incremento sustancial en la generación eléctrica mediante tecnologías alternativas en años recientes. La categoría de generación limpia incluye diversas tecnologías como la eoloeléctrica, solar fotovoltaica, bioenergía, cogeneración eficiente, así como la producción eléctrica proveniente de centrales certificadas con Certificados de Energía Limpia (CEL), además de fuentes geotérmicas, hidroeléctricas y nucleares. De acuerdo con el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2023–2037, la participación de estas fuentes en la generación neta de electricidad alcanzó el 31.16% en 2022, lo que representa un incremento de 1.69 puntos porcentuales respecto al año anterior (SENER, 2022).

En el ámbito regional, el estado de Coahuila se distingue por la disponibilidad significativa de recursos energéticos, tanto en hidrocarburos no convencionales como en fuentes renovables. En relación con los primeros, datos de la Comisión Nacional de Hidrocarburos indican que las cuencas de Sabinas y Burro-Picachos —cuya extensión se encuentra mayoritariamente dentro del territorio estatal— concentran aproximadamente el 47% de los recursos prospectivos identificados a nivel nacional (Gobierno del Estado de Coahuila de Zaragoza, 2024).

Por otro lado, el Atlas de Zonas con Energías Limpias, elaborado por la Secretaría de Energía (SENER), señala que Coahuila cuenta con un potencial técnico para la instalación de hasta 22,500 (MW) en proyectos eólicos y 9,814 (MW) en sistemas solares fotovoltaicos. Estas estimaciones consideran restricciones derivadas de las condiciones topográficas y de la infraestructura disponible. Bajo criterios de aprovechamiento efectivo, se estima que únicamente el 25% del área con potencial eólico y el 3.5% del área con potencial solar podrían ser utilizadas para desarrollos energéticos (Gobierno del Estado de Coahuila de Zaragoza, 2024).

De acuerdo con datos recientes, para el año 2023 Coahuila alcanzó una capacidad instalada de 1,406 (MW) de energías limpias, con una producción anual estimada cercana a los 4,000–4,500 (GWh), lo que refleja un avance significativo, aunque aún distante de las proyecciones iniciales (AMDEE, 2023).

4. MODELOS ENERGETICOS EUROPEOS

La generación de electricidad mediante fuentes renovables constituye un eje estratégico de interés político, económico y social en el contexto de la Unión Europea (UE). Esta región ha reconocido desde hace tiempo la importancia de promover el aprovechamiento de energías limpias, dado que su implementación contribuye a la mitigación del cambio climático, fortalece la seguridad energética y estimula el desarrollo de sectores industriales vinculados al empleo, la competitividad, el crecimiento económico y el progreso regional y rural. En el marco europeo, Alemania y España se posicionan como referentes en la adopción de modelos de generación eléctrica sustentados en fuentes renovables (Ferrara, 2013). A continuación, se examinan las principales medidas de fomento incluidas en los respectivos planes nacionales de acción en materia de energías renovables elaborados por ambos países.

Modelo Energético: España

España ha apostado por un modelo descentralizado, donde la generación distribuida cobra protagonismo. En 2025, más de la mitad de la electricidad proviene de

fuentes renovables, con la solar fotovoltaica y la eólica liderando el sector energético. Este avance ha sido posible gracias a políticas que incentivan la instalación de paneles solares en hogares, comunidades energéticas y parques eólicos regionales.

Este país también cuenta con un mecanismo de "Tarifas de inyección a la red" (FiT por sus siglas en ingles) que ha constituido una herramienta política para fomentar el despliegue de tecnologías de energías renovables (TER) y contribuir a un futuro energético libre de combustibles fósiles (Solangi, 2021), el mecanismo incorpora dos alternativas de retribución mediante: tarifas fijas o primas sobre los precios del mercado eléctrico, en otras palabras, los generadores deben optar entre transferir electricidad mediante la red de transporte o distribución y ser pagados con una tarifa fija por ello o vender la electricidad al mercado mayorista eléctrico al precio horario que se negocie libremente en este mercado y complementado con una prima específica para cada área tecnológica renovable (Ferrara, 2013).

Por tanto, en las energías renovables, la energía eólica representa el 23.5% y la solar fotovoltaica el 13.6%, mientras que la hidráulica aporta el 11.2%. La potencia instalada renovable alcanzó los 72.3 (GW), de los cuales 30.1 (GW) corresponden a eólica y 21.7 (GW) a solar (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2025).

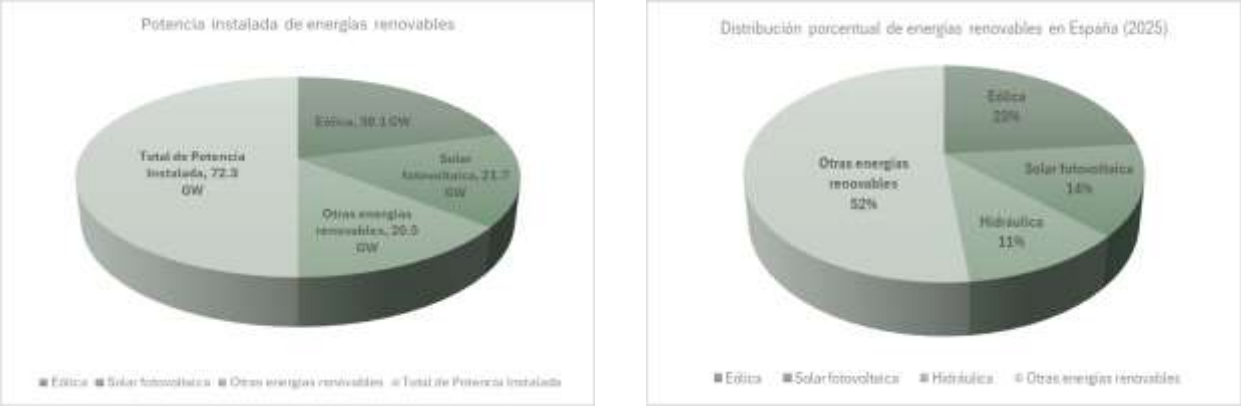


Figura 1. Potencia instalada y distribución de energías renovables en España (Elaboración Propia con base en IDAE, 2025).

El país ha invertido en *"redes inteligentes"* que permiten una gestión eficiente del consumo y la producción energética en tiempo real. El almacenamiento energético también ha sido clave, con baterías domésticas y sistemas a gran escala que compensan la intermitencia de las fuentes renovables.

Se han instalado más de 250,000 sistemas de autoconsumo solar en hogares y empresas, lo que refleja una fuerte tendencia hacia la generación distribuida. Las redes inteligentes cubren ya más del 60% del territorio nacional, permitiendo una gestión eficiente del consumo y la producción energética (Red Eléctrica de España, 2025).

Modelo Energético: Alemania

Alemania en la actualidad se ha posicionado como una de las principales naciones a nivel mundial interesadas en alcanzar una real soberanía energética con base en las energías renovables y a su vez lograr proteger al ser humano y el medio ambiente. La matriz de producción de energía eléctrica en Alemania está marcada principalmente por la producción de carbón como fuente principal

de creación de energía eléctrica en el país, además de la creciente inclusión de energías alternativas dentro de la producción eléctrica, principalmente por las energías solares, fotovoltaicas y eólicas (DW Global Media Forum, 2025).

En el ámbito regulatorio, se dispone de una legislación específica sobre fuentes de energía renovable que garantiza a las instalaciones de generación eléctrica mediante tecnologías limpias una conexión inmediata y prioritaria a la red eléctrica. Esta normativa también establece la obligación, por parte de los operadores del sistema, de adquirir, transportar y distribuir la electricidad generada a partir de dichas fuentes. Asimismo, el marco legal contempla un esquema de tarifas fijas y diferenciadas, determinadas según el tipo de tecnología empleada y la escala de las plantas generadoras. Estas tarifas, que deben ser abonadas por los operadores de la red, se aplican durante un periodo de 20 años bajo el modelo conocido como *"Tarifas de inyección a la red"*. El cálculo de las tarifas se basa en el costo real de generación, incluyendo los gastos de inversión, y se ajustan anualmente mediante una tasa de reducción progresiva (Ferrara, 2013).

Desglosando a profundidad el papel de cada una de las fuentes energéticas, en Alemania se observa que para el año 2018 la producción eléctrica a partir de carbón fue de 229 (TWh), representó la principal fuente energética de generación del país, seguido por la energía proporcionada por la fuerza cinética del viento o eólica con una producción de 111.6 (TWh), posteriormente se encuentran la energía fósil del gas natural y la polémica energía nuclear con una producción anual de 83 (TWh) y 76.1 (TWh), respectivamente (CFE, 2020).

Actualmente la prioridad del gobierno alemán es comprender el panorama general del sistema energético del país, entender de qué forma se debe adaptar el sistema actual a las nuevas fuentes de generación eléctrica, derivado de ello, Alemania ha alcanzado una participación renovable del 63% en su generación eléctrica en 2025. La energía eólica representa el 27%, la solar el 21% y la biomasa el 7%. La potencia instalada renovable supera los 140 (GW), con 60 (GW) de eólica terrestre y 45 (GW) de solar (CFE, 2020).

El país ha iniciado la construcción de una red nacional de hidrógeno de 9,040 (km), con una inversión de 18.9 mil millones de euros, proyectando una capacidad de producción de 10 (GW) de hidrógeno verde para 2030. Además, se han instalado 100 (GWh) de capacidad de almacenamiento energético, lo que permite estabilizar la red ante la eliminación del carbón y la energía nuclear (DW Global Media Forum, 2025).

5. MODELO ENERGETICO CHINO

Desde que China abrió sus puertas al comercio internacional en 1970, la energía barata procedente del carbón ha sido la base que ha permitido impulsar su competitividad económica a nivel mundial (Córdoba, 2023). En la actualidad, China es el mayor consumidor, productor e importador de carbón del mundo, además dichos consumos y producciones representan, cada uno, la mitad de la proporción mundial. En 2021, el carbón representó el 56% del consumo total de energía. A pesar de que los niveles de carbón han ido disminuyendo a partir de la segunda mitad de la década de 2010, el carbón se sigue manteniendo como principal fuente de energía primaria (You, 2025).

En años recientes, China ha registrado progresos significativos en su transición hacia un modelo de desarrollo orientado a la sostenibilidad. A nivel nacional, el gobierno

ha incorporado la protección ambiental y la eficiencia energética como pilares estratégicos dentro de sus políticas estatales, consolidando un consenso político amplio y cohesionado en torno a estos objetivos. Paralelamente, ha intensificado de manera progresiva sus compromisos en materia de reducción de emisiones de gases contaminantes, fortaleciendo su posicionamiento en la agenda climática global (Gao, 2025).

Durante el año 2023, China alcanzó una capacidad instalada total de generación eléctrica de 2.92 (TW), de los cuales 1.7 (TW) —equivalentes al 58.2%— corresponden a fuentes de energía limpia, incluyendo solar, eólica, hidroeléctrica y nuclear. La generación total de electricidad fue de 10.6 (PWh), con 3.8 (PWh) —el 39.7%— provenientes de tecnologías renovables. El consumo nacional de energía limpia representó el 26.4% del total, lo que refleja un incremento de 10.9 puntos porcentuales en comparación con el año 2013 (Administración Nacional de Energía, 2023).

En términos de expansión, China contribuyó con el 55% de las nuevas incorporaciones globales en generación renovable durante 2023. La capacidad en construcción de energía eólica (más de 180 GW) y solar (más de 159 GW) supera ampliamente la del resto del mundo. Ese mismo año, el país asiático instaló una cantidad de capacidad solar fotovoltaica equivalente a la suma global de 2022, mientras que la capacidad eólica aumentó un 66% respecto al año anterior. En el periodo comprendido entre 2018 y 2023, China también sumó 11 (GW) de capacidad nuclear, posicionándose como el país con mayor crecimiento en este recurso (IEA, 2025).

Desde el ámbito gubernamental, China ha adoptado una política activa de cooperación internacional orientada a liderar la transición energética global. Esta estrategia se materializa a través de inversiones y financiamiento en proyectos de energías renovables en regiones clave como América Latina, promoviendo la construcción de centrales hidroeléctricas y parques solares, al tiempo que facilita la transferencia de tecnologías limpias y fomenta alianzas económicas (Ugarteche, 2023).

Algo innegable en la comunidad internacional es el genuino interés de China en el despliegue e inversión en energías renovables. Aparte de ser el mayor productor de energía hidráulica, eólica y solar, China también es el mayor inversor nacional y extranjero en energías renovables (Córdoba, 2023).

6. METODOLOGÍA

La selección de España, Alemania y China para el presente análisis no fue aleatoria. Estos países representan trayectorias diferenciadas en la transición hacia sistemas energéticos sostenibles: España destaca por su enfoque en políticas de cohesión social y territorial; Alemania, por su modelo basado en la innovación tecnológica y la participación ciudadana; y China, por su estrategia de planificación centralizada y aprovechamiento de la escala productiva (García-García, 2025) (Trenks, 2024) (Li, 2024). El contraste entre estos modelos permite establecer una base comparativa sólida para identificar estrategias potencialmente adaptables al contexto mexicano, particularmente en la Región Carbonífera de Coahuila, donde la estructura económica mantiene una alta dependencia de la extracción y uso del carbón.

La metodología empleada se estructura en tres etapas. En primer lugar, se llevó a cabo la revisión documental y bibliográfica que fue orientada a reconocer los elementos centrales de cada modelo energético. Este proceso

permitió identificar de los modelos energéticos consultados la composición de la matriz energética, el nivel de participación de las fuentes renovables, el marco regulatorio vigente y las estrategias impulsadas para fomentar la innovación tecnológica, misma que se describe en párrafos anteriores.

En una segunda fase, se aplicó un análisis *FODA* (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas) (ver tabla 2) con el propósito de sintetizar, de manera comparativa, los factores internos y externos que influyen en el desempeño de cada modelo. Esta herramienta facilita no solo la detección de patrones comunes, sino también el reconocimiento de diferencias estructurales que explican las particularidades de cada experiencia nacional.

Finalmente, en la tercera etapa, se elaboró un Cuadro de Mando Integral (CMI) el cual proporciona un marco completo para medir el rendimiento en varias áreas clave y permite conseguir avances hacia objetivos estratégicos desde diferentes perspectivas. Su aplicación al caso de la región carbonífera de Coahuila busca generar una propuesta integral que armonice los objetivos de diversificación productiva, inclusión social y tecnología, proporcionando así una base analítica para el diseño de políticas públicas energéticas ajustadas al contexto regional y local (ver tabla 2).

7. RESULTADOS

Derivado del análisis comparativo de los modelos energéticos de Alemania, España y China, se construyó una matriz FODA (Ver tabla 1). Este instrumento metodológico conserva su carácter prospectivo al fungir como insumo para la formulación de estrategias orientadas a una transición energética sostenible en la Región Carbonífera de Coahuila. Dichas estrategias se articularon posteriormente con la elaboración de un Cuadro de Mando Integral (CMI) (Ver tabla 2), diseñado a partir de las cuatro perspectivas fundamentales: económica, procesos internos, aprendizaje/innovación y sociedad. De esta manera, el FODA no sólo cumple su función diagnóstica, sino que se vincula con la estructuración del CMI, garantizando la coherencia entre el análisis estratégico y la gestión de resultados.

Tabla 1. Análisis FODA

Dimensión	Alemania	España	China
Fortalezas (+)	Marco regulatorio robusto; alta inversión en I+D; red nacional de hidrógeno en expansión	Modelo descentralizado; incentivos al autoconsumo; redes inteligentes	Liderazgo mundial en capacidad instalada; planificación estatal centralizada; inversión nacional e internacional
Debilidades (−)	Altos costos de transición; dependencia histórica del carbón; baja irradiación solar	Intermitencia renovable; infraestructura rural obsoleta; burocracia en permisos	Dependencia del carbón; desigualdad regional; riesgos ambientales por megaproyectos
Oportunidades	Expansión de hidrógeno verde; exportación tecnológica; integración con redes europeas	Potencial solar y eólico; comunidades energéticas; fortalecimiento del almacenamiento	Reducción progresiva del carbón; innovación en geotermia y energía oceánica; autoconsumo urbano

Amenazas	Inestabilidad política en subsidios; saturación de red; oposición social	Volatilidad del mercado eléctrico; conflictos sociales; vulnerabilidad ante crisis	Tensiones geopolíticas; contaminación persistente; desafíos de gobernanza

Fuente: Elaboración propia basado en (Ferrara, 2013) (Li, 2024) (Ugarteche, 2023) (Fraunhofer ISE, 2025) y otros.

Del análisis FODA, podemos integrar cruces estratégicos para cada caso en específico:

Alemania:

FO (Fortalezas–Oportunidades): Aprovechar el marco regulatorio y la inversión en I+D para acelerar proyectos de hidrógeno verde, consolidando al país como exportador de tecnología energética.

DA (Debilidades–Amenazas): Diseñar mecanismos financieros que reduzcan los costos de transición y mitiguen la dependencia del carbón, asegurando estabilidad en subsidios y evitando la saturación de la red.

España:

FO: Impulsar comunidades energéticas y autoconsumo aprovechando el potencial solar y eólico, apoyados en incentivos económicos y redes inteligentes.

DA: Simplificar trámites y modernizar infraestructura rural para reducir la vulnerabilidad ante crisis energéticas y conflictos sociales.

China:

FO: Utilizar la inversión estatal y el liderazgo en capacidad instalada para expandir el autoconsumo urbano y desarrollar nuevas tecnologías (geotermia, energía oceánica).

DA: Implementar políticas de transición gradual que reduzcan la dependencia del carbón y mejoren la transparencia en gobernanza, mitigando tensiones geopolíticas y riesgos ambientales.

Tabla 2. Cuadro de mando integral (CMI).

Perspectiva	Objetivo Estratégico	Alemania (KPI, Meta, Acción)	España (KPI, Meta, Acción)	China (KPI, Meta, Acción)
Económica	Impulsar renovables y autoconsumo	**KPI:** % capacidad renovable en red; **Meta:** 80% en 2030; **Acción:** subsidios estables, inversión en hidrógeno.	**KPI:** % hogares con FV; **Meta:** 20% en 2030; **Acción:** incentivos al autoconsumo, *"tarifas de inyección a la red"*	**KPI:** inversión estatal en manufactura; **Meta:** liderazgo global en 2035; **Acción:** expansión masiva y financiamiento estatal.
Procesos Internos	Fortalecer red y normativa	**KPI:** % renovables con prioridad en red; **Meta:** integración plena en 2030; **Acción:** normativa exigente y redes inteligentes.	**KPI:** tiempo promedio de autorización; **Meta:** <3 meses en 2027; **Acción:** simplificación de trámites y ventanilla única.	**KPI:** cumplimiento de metas de Ley de Energía; **Meta:** 40% renovables en 2030; **Acción:** planificación centralizada.
		KPI: % PIB en I+D; **Meta:** 3% en 2035;	**KPI:** número de comunidades	**KPI:** capacidad instalada solar/eólica;

Aprendizaje/ Innovación	Fomentar innovación y comunidades	**Acción:** desarrollo de almacenamiento y eficiencia.	energéticas; **Meta:** 50 en 2028; **Acción:** educación ciudadana y apoyo técnico.	**Meta:** duplicar en 2030; **Acción:** innovación tecnológica y expansión de autoconsumo.
Sociedad	Reducir pobreza energética y garantizar acceso	**KPI:** % hogares con acceso; **Meta:** 100% en 2035; **Acción:** participación ciudadana y justicia energética	**KPI:** costo promedio electricidad; **Meta:** -15% tarifas hogares vulnerables; **Acción:** autonomía energética local y tarifas sociales.	**KPI:** % hogares con acceso a energía limpia; **Meta:** 95% en 2035; **Acción:** programas estatales de acceso masivo.

Fuente: Elaboración propia basado en (García-García, 2025), (Trenks, 2024), (Li, 2024) y otros.

Del análisis comparativo de los modelos energéticos de Alemania, España y China, y considerando las condiciones socioeconómicas, ambientales y regulatorias de la Región Carbonífera de Coahuila, se elaboró una matriz FODA (Ver tabla 3) que permitió establecer elementos para la formulación de un Cuadro de Mando Integral (CMI) (ver tabla 4) que permita identificar indicadores clave para orientar una transición energética justa y sostenible en el contexto local. El CMI se estructuró en las mismas cuatro perspectivas estratégicas analizadas previamente: económica, procesos internos, aprendizaje/innovación y sociedad. Cada una de ellas incorpora objetivos específicos, indicadores de desempeño y acciones recomendadas que responden a las necesidades locales y se basan en las mejores prácticas observadas.

Tabla 3. Matriz FODA de la Región Carbonífera de Coahuila como insumo para estrategias de transición energética justa.

Dimensión	Factores identificados
Fortalezas (+)	✓ Reservas abundantes de carbón bituminoso (más de 1,200 millones de toneladas). ✓ Infraestructura minera y energética consolidada (plantas termoeléctricas, logística, conocimiento técnico local). ✓ Potencial de valorización de residuos industriales (cenizas con litio y tierras raras). ✓ Experiencia histórica y capital humano especializado en minería y energía.
Debilidades (−)	✓ Alta dependencia histórica del carbón como combustible fósil. ✓ Percepción social y política de obsolescencia del carbón. ✓ Impactos ambientales acumulados por décadas de explotación. ✓ Escasa diversificación productiva en la región. ✓ Vulnerabilidad frente a importaciones de carbón y combustibles.
Oportunidades	✓ Recuperación de minerales críticos (litio y tierras raras) desde residuos industriales. ✓ Desarrollo de nuevas cadenas de valor basadas en economía circular y ecotecnologías. ✓ Reconversión de plantas termoeléctricas en polos de innovación tecnológica. ✓ Generación de empleo calificado

	✓ Fortalecimiento de la soberanía energética nacional al reducir dependencia de importaciones.
Amenazas	✓ Volatilidad de los mercados energéticos internacionales. ✓ Riesgo de exclusión social si la transición se hace sin alternativas laborales. ✓ Persistencia de contaminación y pasivos ambientales. ✓ Posible resistencia política a modelos alternativos de transición.

Fuente: Elaboración propia basada en (Ramírez, 2025), (Camacho, 2025), (WWF, 2021), (Gobierno del Estado de Coahuila de Zaragoza, 2024).

La matriz FODA no solo identifica factores internos y externos, sino que los relaciona para derivar estrategias. Por ejemplo, las fortalezas de infraestructura y conocimiento técnico se cruzan con la oportunidad de recuperar minerales críticos, generando una estrategia FO orientada a reconvertir residuos en polos de innovación. De igual forma, las debilidades históricas de dependencia del carbón se vinculan con amenazas de exclusión social, lo que deriva en estrategias DA de reconversión laboral y restauración ambiental.

Tabla 4. Cuadro de mando integral (CMI) para la Region Carbonífera de Coahuila.

Perspectiva	Objetivo Estratégico	Indicador (KPI)	Meta	Acción/Iniciativa
Económica	Revalorizar el carbón mediante la recuperación de minerales críticos (litio y tierras raras)	Toneladas de litio y ETR recuperadas anualmente	285 t de litio y 6300 t de ETR en 2030	Implementar plantas piloto de valorización de residuos termoeléctricos y atraer inversión público-privada
Procesos Internos	Reconversión de plantas termoeléctricas en polos de innovación tecnológica	Número de plantas reconvertidas	Plantas reconvertidas (al menos 2) en 2028	Aplicar tecnologías CCUS y procesos hidrometalúrgicos sostenibles en colaboración con universidades. Financiar proyectos de I+D en energía limpia.
Aprendizaje/ Innovación	Fortalecer capacidades locales en ecotecnologías y economía circular	Número de técnicos y profesionales capacitados	500 personas capacitadas en 5 años	Crear programas de formación técnica y convenios universidad-industria
Sociedad	Garantizar una transición justa con inclusión laboral y bienestar comunitario	% de trabajadores reubicados.	80% de trabajadores reubicados en 2030	Diseñar programas de reconversión laboral y participación comunitaria vinculante

Fuente: Elaboración propia basada en (Ramírez, 2025), (Camacho, 2025), (WWF, 2021), (Gobierno del Estado de Coahuila de Zaragoza, 2024).

Este CMI traduce los resultados del FODA en acciones estratégicas medibles, vinculando las fortalezas (infraestructura, conocimiento técnico) con las oportunidades (valorización de residuos, soberanía energética). Las perspectivas económicas y procesos internos responden a la necesidad de reconvertir la infraestructura existente, las perspectivas de aprendizaje e innovación fortalecen el capital humano y la transferencia tecnológica, la perspectiva social garantiza que la transición sea justa, evitando exclusión y fortaleciendo la cohesión territorial.

9. CONCLUSIONES

El análisis comparativo de los modelos energéticos de Alemania, España y China sirvió como referencia inicial para estructurar

el Cuadro de Mando Integral (CMI) de la Región Carbonífera de Coahuila. Este CMI se fundamenta en el diagnóstico FODA regional, lo que permite vincular fortalezas como la infraestructura minera con oportunidades de diversificación productiva, tal como se observó en Alemania y España. La necesidad de diversificar la economía regional se confirma al contrastar la dependencia histórica del carbón con las experiencias internacionales: mientras Alemania impulsó la solar mediante incentivos fiscales y participación ciudadana, China logró escalar la eólica con planificación centralizada. Estos aprendizajes muestran que en Coahuila la transición requiere voluntad política, incentivos adecuados y coordinación público-privada.

En el plano operativo, la discusión evidenció que no basta con instalar tecnologías limpias; la experiencia española subraya la importancia de regulación ambiental y laboral robusta para garantizar procesos seguros y transparentes. En cuanto al aprendizaje e innovación, la presencia de instituciones locales como la Universidad Autónoma de Coahuila abre la posibilidad de replicar lo que Alemania logró al formar talento especializado en energías renovables, generando empleos verdes y nuevas oportunidades.

Finalmente, la dimensión social se sostiene en la evidencia de que los países más avanzados en transición energética lo hicieron con inclusión de comunidades afectadas. Para la Región Carbonífera de Coahuila, esto implica escuchar a quienes han vivido del carbón y ofrecer alternativas reales. Al integrar estos factores en las perspectivas económica, operativa, social y de innovación, el CMI ofrece una visión estratégica más completa, capaz de orientar una transición energética justa y situada en las condiciones reales del territorio.

8. BIBLIOGRAFIA

Administración Nacional de Energía. (2023). *Libro Blanco: La Transición Energética de China.* Xicheng, Beijing: Oficina del Consejo de Estado de la República Popular China.

Allub, L. &. (2024). Una nueva transición energética: rasgos, desafíos y perspectivas desde América Latina y el Caribe. *RED 2024*.

AMDEE. (2023). *Datos de capacidad instalada en Coahuila.* Mexico: AMDEE.

Banco de Desarrollo de América Latina y el Caribe. (24 de septiembre de 2024). *Banco de desarrollo de América Latina y el Caribe*. Obtenido de Transición Energética Justa / Escenarios México: https://scioteca.caf.com/handle/123456789/2334

Bortz, G. M. (2022). Reflexiones sobre procesos de participación y democratización del conocimiento como desafíos para la transición energética justa en América Latina.

Camacho, L. F. (2025). Transición energética con justicia: El nuevo papel del carbón de Coahuila, Noreste de México. *Geomimet*, 11-14.

Carabio, S. (2023). El hidrógeno verde en Argentina, desafíos y oportunidades en el marco de la transición energética: Un análisis desde la escuela de . *Política Internacional*.

CFE. (2020). *Las energías renovables en la transición energética de Alemania.* Ciudad de México: Comision Federal de Electricidad. Obtenido de Las energías renovables en la transición

energética de Alemania: ttps://www.cfenergia.com/wp-content/uploads/2023/04/Las-energías-renovables-y-la-transición-energética-de-Alemania.pdf

Córdoba, H. P. (2023). China frente al cambio climático: Desafíos y repercusiones de la implementación de las políticas energéticas actuales. *Revista Universitaria de Estudios sobre Asia Oriental*, 313-338.

DW Global Media Forum. (25 de septiembre de 2025). *¿Cuánto ha avanzado la transición energética en Alemania?* Obtenido de DW Global Media Forum: https://www.dw.com/es/cu%C3%A1nto-ha-avanzado-la-transici%C3%B3n-energ%C3%A9tica-en-alemania/a-73968841

Ferrara, P. (2013). Razones, acciones y modelos regulatorios para promover la eficiencia energética y el uso de energías renovables: El caso de Argentina y la Unión Europea: Alemania y España. En E. T. Acuña, *Estudios de Derecho Público* (págs. 975-999). Buenos Aires: Asociación de Docentes de la Facultad de Derecho y Ciencias Sociales-UBA.

Flores, A. (18 de mayo 2024). *Wind Resource Assessment using MERRA-2 and Meteorological Mast Data*. Obtenido de The International Conference on Energy, Power and Environment (ICEPE). IEEE: https://ieeexplore.ieee.org/document/10201587

Fraunhofer ISE. (14 de Febrero de 2025). *German Net Power Generation in 2024: Electricity Mix Cleaner than Ever*. Obtenido de Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE: https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2025/public-electricity-generation-2024-renewable-energies-cover-more-than-60-percent-of-german-electricity-consumption-for-the-first-time.html

Gao, G. (2025). Cooperación China-América Latina en materia de energía limpia. *Ibero-América Studies*, 14-30.

García, N. A. (2024). Retos para la transición energética en Colombia: algunas recomendaciones para los marcos legales de los proyectos de energías renovables a la luz del derecho internacional. *EAFIT*.

García-García, P. (2025). La experiencia española con los planes de transición energética justa impulsados por el gobierno nacional. *Revista de Ciencia Politica*, 1-26.

Gobierno de México. (17 de Abril de 2025). *Minería de Carbón Mineral: producción, inversión y empleo. Actualización 2025*. Obtenido de Secretaria de Economia: https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/industry/investigation-and-security-services?redirect=true

Gobierno del Estado de Coahuila de Zaragoza. (25 de septiembre de 2024). *Programa Especial de Energía 2017-2023.* Obtenido de Programa Especial de Energía 2017-2023: https://coahuila.gob.mx/archivos/pdf/micrositio/Programas%20Especiales/Programa%20Especial%20de%20Energ%C3%ADa.pdf

Gonzalez, E. (2022). Tiempos de acumulación de carbón en México con especial énfasis en la Cuenca de Sabinas México, donde se

proporcionan nuevos datos geocronológicos. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 15.

Guo X., Chen X., Xia-Chen, Sherman P., Wen J., McElroy M. ((2023). *Grid integration feasibility and investment planning of offshore wind power under carbon-neutral transition in China.* Obtenido de Nature Communications, 14:2447 https://doi.org/10.1038/s41467-023-37536-3

IEA. (12 de Noviembre de 2025). *International Energy Agency*. Obtenido de Spain Energy Profile: https://www.iea.org/countries/spain

IEA. (2025). *World Energy Investment 2024.* International Energy Agency.

INEGI. (21 de febrero 2025). *INEGI.* Obtenido de INEGI: https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ccpv/2020/doc/cpv2020_pres_res_coah.pdf

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (27 de septiembre de 2025). *Informe estadístico de energías renovables - junio 2025.* Obtenido de Informe estadístico de energías renovables - junio 2025: https://informesweb.idae.es/informe-estadistico/informe.php

IRENA. (26 de septiembre de 2024). *Renewable Capacity Statistics.* Obtenido de Renewable Capacity Statistics: https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology

Li, J. S. (2024). The Path Driving China's Energy Structure Transformation from the Perspective of Policy Tools. *Sustainability*, 1-19.

Molinari, A. (2024). Financiamiento de la transición energética en América Latina: el papel de los bancos multilaterales de desarrollo. *Desafios*, 36-38.

Montaño, D. J. (2021). *Electrifying Mexico: Technology and the Transformation of a Modern City.* Obtenido de University of Texas Press.: https://doi.org/10.7560/323458

Probst, O. (2024). Clean Energy and Carbon Emissions in Mexico's Electric Power Sector: Past performance and current trend. *energies*, 1-29.

Ramírez, I. T. (12 de enero 2025). *La Región Carbonífera de Coahuila: problemas estructurales y perspectivas.* Obtenido de La Región Carbonífera de Coahuila: problemas estructurales y perspectivas: https://ru.iiec.unam.mx/6134/1/6.%20072-T%C3%A9llez-S%C3%A1nchez.pdf

Red Eléctrica de España. (23 de marzo de 2025). *Informe del Sistema Eléctrico: Energías Renovables 2024.* Obtenido de Informe del Sistema Eléctrico: Energías Renovables 2024.: https://www.sistemaelectrico-ree.es/sites/default/files/2025-03/Informe_Renovables_2024.pdf

Romero, R. (2021). Development of geothermal energy in México and its energetic potential for the future. En P. Birkle, *Towards a Cleaner Planet* (págs. 343-363). Berlin, Heidelberg: Springer.

Schutte, G. R. (2023). El papel de las petroleras estatales en la transición energética de América Latina: los casos de Petrobras, YPF, Ecopetrol y Pemex.

SENER. (2022). *Balance Nacional de Energía.* CDMX: Dirección General de Planeación e Información Energética.

SENER. (2023). *Atlas Nacional de zonas con alto potencial de energias limpias.* Ciudad de Mexico: Gobierno de Mexico.

SENER. (2023). *Programa de desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2023-2027.* Ciudad de México: Gobierno de México.

Sepúlveda, V. (2024). *Oportunidades y desafíos de power-to-x para la transición energética en América Latina (Tesis de Maestria).* Santiago de Chile: Universidad de Chile.

SGM. (10 de Noviembre de 2025). *Servicio Geológico Mexicano.* Obtenido de Anuario estadístico de la minería mexicana: https://www.sgm.gob.mx/productos/pdf/Anuario_2023_Edicion_2024.pdf

Solangi, Y. A. (2021). Assessing and overcoming the renewable energy barriers for sustainable development in Pakistan: An integrated AHP and fuzzy TOPSIS approach,. *Renewable Energy*, 209-222.

Tenorio Gamboa, F. (2023). *La política energética de México y China: un estudio comparativo (2010-2022) Tesis de Licenciatura.* Universidad de las Americas Puebla (UDLAP), Puebla México, 110 p. https://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lri/tenorio_gamboa_fl/etd_3071035922381.pdf

Toledo, G. (2020). *Diseño y desarrollo de un modelo energetico para el Sistema Electrico Mexicano (Tesis de Maestria).* Cuernavaca, Morelos: Universidad Autónoma el Estado de Morelos. https://riaa.uaem.mx/handle/20.500.12055/2110

Trenks, H. &. (2024). - Empowering citizens for the energy transition: facilitating role change through real-world experiments. *Sustainability Science*, 1-23.

Ugarteche, O. (2023). China and the energy matrix in Latin America: Governance and geopolitical perspective. *Energy Policy*.

WWF. (2021). *Perspectivas de la industria del carbón en Coahuila.* Obtenido de WWF: https://wwflac.awsassets.panda.org/downloads/perspectivas_de_la_industria_del_carbon_en_coahuila_2021_wwf_mexico_vf_web.pdf

You, X. (29 de marzo de 2025). *What does China's coal push mean for its climate goals?* Obtenido de Carbon Brief: https://www.carbonbrief.org/analysis-what-does-chinas-coal-push-mean-for-its-climate-goals/

Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Inteligencia computacional en la sincronización de sistemas dinámicos

Computational intelligence in the synchronization of dynamical systems

Pulido-Luna, J.R.[a], López-Rentería, J.A.[b,d], Cárdenas-Maciel, S.L.[c], Cázarez-Castro, N.R.[d]*

[a] Dirección de Posgrado e Investigación; Universidad Tecnológica de Tijuana; C. P. 22253, Tijuana, Baja California. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5141-9915.
[b] SECIHTI - Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica; Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tijuana; C. P. 22430, Tijuana, Baja California. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1663-3211.
[c] Departamento de Ciencias Básicas; Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tijuana; C. P. 22414, Tijuana, Baja California. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8459-9924.
[d] Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica; Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tijuana; C. P. 22430, Tijuana, Baja California. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6787-3947*.
jesus.pulido@uttijuana.edu.mx; jorge.lopez@tectijuana.edu.mx; lilettecardenas@ieee.org; nohe@ieee.org*

Innovación tecnológica: Aplicación de sistemas difusos como controladores adaptativos para lograr la sincronización de sistemas dinámicos.

Área de aplicación: Ingeniería de control, automatización, robótica y mecatrónica.

Recibido: 18 diciembre 2025
Aceptado: 08 junio 2026

Abstract

This popular science article presents the synchronization of dynamical systems, a phenomenon observed across nature, science and engineering. Its aim is to explain, in a clear and accessible manner, how computational intelligence (particularly fuzzy systems) can be used as a flexible and efficient strategy to achieve synchronization between dynamic systems. The evolution of the concept is traced from Christiaan Huygens' experiments to contemporary leader–follower control models. This work explains how fuzzy logic enables the adjustment of control gains based on the error between systems, improving energy efficiency and reducing the need for manual tuning. Finally, it concludes that fuzzy systems represent an adaptable and robust alternative for synchronization control by integrating expert knowledge, uncertainty, and qualitative analysis.

Keywords: Synchronization, dynamical systems, computational intelligence, fuzzy logic, control.

Resumen

Este artículo de divulgación presenta la sincronización de sistemas dinámicos, un fenómeno presente en la naturaleza, ciencia e ingenierías. Su objetivo es explicar, de manera clara y accesible, cómo la inteligencia computacional (particularmente los sistemas difusos), puede emplearse como una estrategia flexible y eficiente para lograr la sincronización entre sistemas dinámicos. Se presenta la evolución del concepto desde los experimentos de Christiaan Huygens hasta los modelos contemporáneos de control líder-seguidor. Se explica cómo la lógica difusa permite ajustar las ganancias de control en función del error entre los sistemas, mejorando la eficiencia energética y reduciendo la necesidad de ajustes manuales. Se concluye que los sistemas difusos constituyen una alternativa adaptable y robusta para el control de sincronización, al integrar conocimiento experto, incertidumbre y análisis cualitativo.

Palabras clave: Sincronización, sistemas dinámicos, inteligencia computacional, lógica difusa, control.

1. Introducción

La sincronización es un fenómeno fascinante que puede observarse en numerosos aspectos del mundo natural y tecnológico: desde los relojes de péndulo de Huygens que se movían al unísono, hasta los sistemas eléctricos, biológicos y sociales que ajustan su comportamiento para trabajar de forma conjunta [1][2]. En ingeniería, la sincronización resulta esencial para garantizar que distintos componentes de un sistema operen de manera coordinada, eficiente y estable.

Con el avance de la inteligencia computacional, nuevas herramientas permiten abordar estos problemas de sincronización con mayor flexibilidad. Una de las más destacadas es la lógica difusa, una técnica inspirada en la forma en que los humanos interpretan conceptos imprecisos o ambiguos [3]. A diferencia de los métodos clásicos, los sistemas difusos pueden adaptar sus decisiones en función del contexto, permitiendo un control más natural y eficiente.

En este artículo de divulgación científica se explora, de manera accesible y dirigida a un público general con interés en ciencias e ingeniería, cómo los sistemas difusos pueden aplicarse a la sincronización de sistemas dinámicos. Con este objetivo, se integra la evolución histórica del concepto de sincronización, los fundamentos de los sistemas difusos y su aplicación al esquema de control líder-seguidor, mostrando cómo esta tecnología puede ajustar automáticamente los parámetros de control en función del error entre los sistemas a sincronizar.

2. Sincronización

En 1656, el investigador holandés Christiaan Huygens, conocido por sus estudios en óptica y la construcción de telescopios y relojes, fue el primer científico que observó y describió el fenómeno que hoy conocemos como sincronización. Huygens descubrió que un par de relojes de péndulo colgados de un soporte en común se habían sincronizado, es decir, sus oscilaciones coincidían de forma perfecta y los péndulos se movían al mismo tiempo en direcciones opuestas. Huygens logró dar no sólo una descripción exacta, sino también una explicación cualitativa de este efecto de sincronización mutua; recalcó correctamente que la conformidad de los ritmos de dos relojes había sido causada por un movimiento imperceptible de la viga de madera en la que se encontraban colgados. En la actualidad, esto significa que los relojes

estaban sincronizados debido al acoplamiento a través de la viga de madera (ver Figura 1 Dibujo original de Christiaan Huygens ilustrando sus experimentos con el par de relojes de péndulo apoyados sobre una viga de madera [1].).

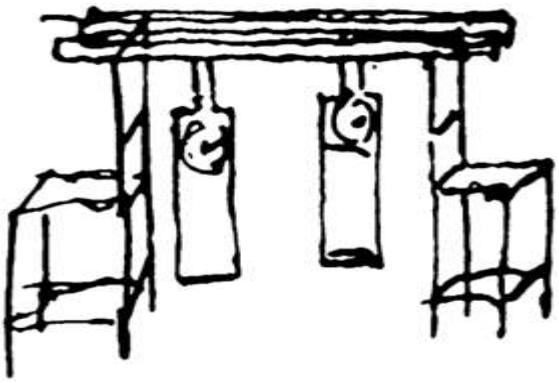


Figura 1 Dibujo original de Christiaan Huygens ilustrando sus experimentos con el par de relojes de péndulo apoyados sobre una viga de madera [1].

La sincronización es, en términos generales, un proceso en el que dos o más sistemas interactúan entre sí dando como resultado una evolución conjunta de algunas de sus propiedades dinámicas. Estos sistemas son capaces de ajustar su ritmo, “influidos unos por otros”, mostrando el mismo comportamiento a lo largo del tiempo [1].

La sincronización es un fenómeno que se puede observar en muchos aspectos de la vida cotidiana, y puede ser explicado por la existencia de osciladores autónomos que pueden estar acoplados entre sí. Los osciladores son sistemas que experimentan movimientos periódicos en el tiempo y pueden ser encontrados en muchas áreas de la física, la biología, la química y otras disciplinas. Por ejemplo, en el cuerpo humano, el ritmo circadiano es un oscilador que marca el tiempo en función de la rotación de la tierra. Este ritmo se sincroniza con los ciclos de luz y oscuridad y afecta a muchas funciones fisiológicas, como la temperatura corporal, la producción de hormonas y los patrones de sueño. Otro ejemplo de sincronización se puede encontrar en los relojes atómicos, que funcionan a partir de oscilaciones en la energía de los átomos.

Al mantener la frecuencia de oscilación constante, estos relojes pueden mantener una precisión increíblemente alta en la medición del tiempo. La sincronización también puede ser observada en sistemas sociales y en la naturaleza. Por ejemplo, muchos animales migran en sincronía en respuesta a cambios estacionales en el clima. En la Figura 2. Parvada de patos en migración síncrona., es posible observar una parvada de patos en proceso de migración. Algunos insectos, como las abejas, utilizan patrones de danza sincronizados para comunicar información sobre la ubicación de las flores [2].



Figura 2. Parvada de patos en migración síncrona.

Sin embargo, en algunas ocasiones el fenómeno de la sincronización no se da naturalmente, para esos casos se puede lograr de forma artificial al utilizar un controlador apropiado (por ejemplo, un dispositivo externo). Con el uso de un controlador es posible forzar la sincronización, modificar el tipo de sincronización presente o incluso eliminar la sincronización entre dos sistemas. Así como los ejemplos de fenómenos de sincronización mencionados, una variedad de problemas en ciencias e ingeniería requieren de sistemas cuyos comportamientos se acoplen entre si hasta ser el mismo. Frecuentemente se emplea una estrategia de sincronización de tipo líder–seguidor (también conocida como sincronización

maestro-esclavo) que destaca por su relativa facilidad para crear e implementar.

3. Sistemas dinámicos

El estudio de los sistemas dinámicos es esencial para describir la evolución de un fenómeno a lo largo del tiempo. Los sistemas mecánicos, biológicos, químicos, entre otros, son ejemplos claros de sistemas dinámicos que han sido estudiados en diversas áreas de las ciencias e ingenierías. Para describir estos fenómenos de la vida real, se utilizan expresiones matemáticas conocidas como modelos matemáticos, que establecen una regla específica de la dependencia del tiempo de las diferentes características del fenómeno estudiado. Dichos modelos pueden presentarse a través de diagramas causales, gráficas, diagramas de fase, entre otros [4].

La teoría cualitativa de los sistemas dinámicos es el campo de las matemáticas que se encarga de describir los diferentes comportamientos que un sistema dinámico puede presentar. Dentro de estos comportamientos, destacan los atractores, que pueden ser un valor o un conjunto de valores a los que el sistema dinámico permanece después de evolucionar en un lapso de tiempo. Existe una amplia variedad de atractores, pero como puede apreciarse en la Figura 3 Tipos de atractores., se pueden clasificar en cuatro categorías principales: puntos de equilibrio, ciclos límite, variedades y atractores extraños [5].

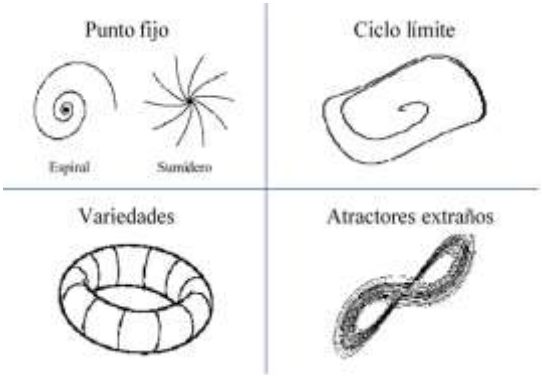


Figura 3 Tipos de atractores.

Los comportamientos antes mencionados se pueden encontrar en sistemas dinámicos asociados a múltiples fenómenos, por ello, las mismas técnicas de análisis que provienen de la teoría cualitativa pueden ser utilizadas. En muchos casos, el estudio de los sistemas dinámicos permite identificar los comportamientos actuales y proponer compensaciones a la dinámica natural (o comportamiento) del sistema dinámico (típicamente por medio de un controlador) para generar un comportamiento diferente, esto significa cambiar la evolución natural del fenómeno en el tiempo. A la acción que implica llevar el sistema de un comportamiento a otro preestablecido o requerido, se le conoce como control de sistemas dinámicos.

Dentro de las distintas técnicas de control disponibles en la literatura relacionada al tema, el uso de sistemas difusos nos provee la flexibilidad de la inteligencia computacional para que, mediante el control de sistemas dinámicos, se logre la sincronización de dos sistemas de interés.

4. Sistemas difusos

Los sistemas difusos son una rama de la inteligencia computacional y la teoría de control que permite modelar y controlar sistemas complejos que no son fáciles de describir con precisión matemática. La lógica difusa se basa en el principio de que muchos conceptos en el mundo real son vagos, imprecisos o ambiguos, y que la forma en que los seres humanos los perciben y manejan es diferente a la forma en que se expresan en términos matemáticos. Por ejemplo, la noción de “alto” o “bajo” es subjetiva y puede variar según el contexto, la cultura y la experiencia de cada persona. En lugar de tratar con valores binarios (verdadero/falso), la lógica difusa permite trabajar con valores continuos, lo que la hace más flexible y adaptable a situaciones complejas.

Un sistema difuso se compone de tres elementos principales: una base de conocimiento, un conjunto de reglas y un mecanismo de inferencia. La base de conocimiento contiene información sobre el problema que se está abordando, expresada en términos de variables lingüísticas (por ejemplo, “temperatura”, “velocidad”, “humedad”, etc.) y los términos que se utilizan para describirlos (por ejemplo, “caliente”, “frío”, “rápido”, “lento”, “seco”, “húmedo”, etc.). Estas variables lingüísticas son denominadas funciones de membresía y sus formas más comunes pueden observarse en la Figura 4. Formas más comunes de las funciones de membresía para la base del conocimiento en un sistema difuso. Las reglas establecen relaciones entre estas variables y establecen cómo se debe actuar en función de las condiciones observadas. El mecanismo de inferencia utiliza estas reglas para determinar la acción adecuada en función de las entradas dadas [3].

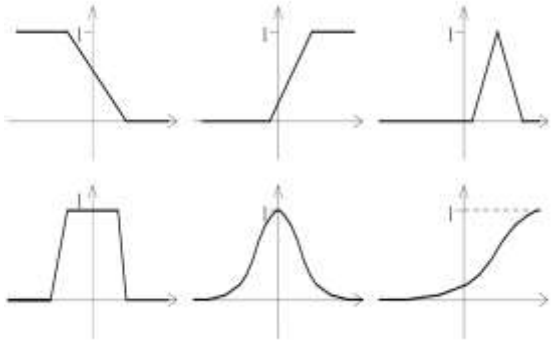


Figura 4. Formas más comunes de las funciones de membresía para la base del conocimiento en un sistema difuso.

Los sistemas difusos se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones, como lo son: el control de procesos industriales [6], la toma de decisiones [7], el análisis de datos [8], la robótica [9][10][11], la medicina [12][13], la economía [14], la sincronización [15] y otros campos donde se requiere modelar sistemas complejos con un alto grado de incertidumbre o subjetividad [16]. Los sistemas difusos pueden ser especialmente útiles en situaciones donde la lógica convencional no es suficiente, como en el caso de sistemas de control que operan en entornos inciertos o cambiantes [17].

Los sistemas difusos son una herramienta poderosa y versátil para modelar y controlar sistemas complejos en situaciones donde la precisión matemática no es compatible para lograr la tarea del modelado. Al permitir trabajar con valores continuos, la lógica difusa es capaz de capturar la subjetividad y la incertidumbre del mundo real y ofrecer soluciones prácticas y efectivas para una amplia variedad de problemas en una amplia gama de campos.

5. Sincronización mediante sistemas difusos

Cuando el objetivo es la sincronización de dos sistemas dinámicos, el primer paso es definir el método con el cual serán sincronizados. La técnica de sincronización más común es el esquema líder–seguidor (comúnmente conocido como maestro–esclavo), en dicho esquema el sistema líder se comporta de forma autónoma, mientras que al sistema seguidor se le agrega un controlador, que con base en la diferencia o error e entre las dinámicas del sistema líder y el sistema seguidor, inyecta una energía o ganancia K en el sistema seguidor para corregir dicho error. Retomando la Figura 2 en la parvada de patos, por analogía se identifica el esquema de líder–seguidor: el pato que va adelante de todos actúa como el sistema líder, volando de forma autónoma, el resto de los patos imitan las acciones del pato líder, es decir, se comportan como un sistema seguidor, imitando el aleteo y decisiones del pato líder, en otras palabras, los patos controlan sus acciones con base en las acciones que el líder toma. El comportamiento del sistema líder y el sistema seguidor se dice que están perfectamente sincronizados si el error entre

ellos es cero. En la Figura 5. Esquema de sincronización de tipo líder–seguidor. es posible observar una representación del esquema de sincronización del tipo líder–seguidor.

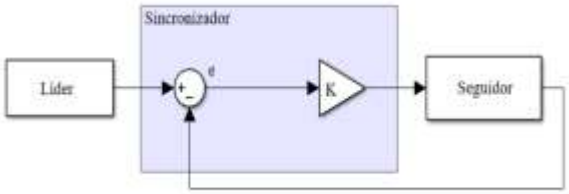


Figura 5. Esquema de sincronización de tipo líder–seguidor.

Los valores apropiados de las ganancias que permiten alcanzar la sincronización de los dos sistemas se determinan a través de las técnicas de análisis cualitativo para sistemas dinámicos, siendo en este caso el sistema que modela la evolución del error entre el sistema líder y el sistema seguidor considerando el controlador. El análisis permite identificar relaciones en cuanto a la forma y la velocidad en que se consigue la sincronización que están influenciadas por la magnitud de las ganancias en el controlador.

Una característica del esquema de sincronización líder–seguidor clásico es el hecho de que las ganancias son valores fijos, es decir, que las fuerzas de acoplamiento comandadas por el controlador serán las mismas sin importar el comportamiento del error presente entre las dinámicas de ambos sistemas. Por lo que, en el escenario en que los sistemas están cercanos a alcanzar o han alcanzado la sincronización, se aplica una cantidad excesiva de energía. Por otra parte, si se tiene el caso opuesto, en el que los sistemas están lejos de alcanzar la sincronización (el error es grande), emplear una ganancia fija trae la posibilidad de que la sincronización suceda en un tiempo grande o incluso que no suceda.

Considerando los inconvenientes citados debido a utilizar ganancias fijas en el controlador, se puede aprovechar las bondades de la inteligencia computacional y específicamente de los sistemas difusos, para incluirlos en el esquema de la Figura 5 buscando la mejoría en el desempeño o efectividad para alcanzar la sincronización. La Figura 6. Esquema de sincronización modificado., muestra el diagrama modificado del esquema de sincronización líder-seguidor que sustituye las ganancias fijas por un sistema de inferencia difuso que ajusta las ganancias en función del comportamiento del error en las dinámicas a través de reglas difusas que se expresan en el sentido: La ganancia disminuye en valor si el error es pequeño; en el caso de que el error es grande entonces la ganancia aumenta en valor [18][19][20].

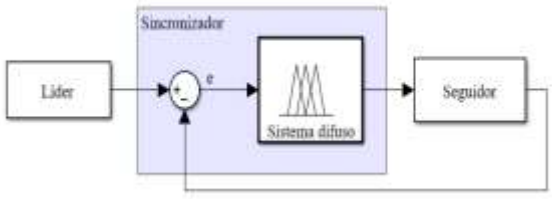


Figura 6. Esquema de sincronización modificado.

El nivel de progresión ascendente o descendente que aplica el sistema de inferencia difuso para adaptar la ganancia y que sea pertinente, se debe a la forma de las funciones de membresías para las variables lingüísticas, las cuales son establecidas con base en el análisis cualitativo del modelo dinámico que incluye al sistema de inferencia difuso, permitiendo observar condiciones en las que garantizan que se obtiene la sincronización [21][22].

Dado que la base de conocimiento expresado en reglas y funciones de membresía tienen relación directa con la manera en que se modifica la dinámica (comportamiento) del sistema seguidor para llevar a cabo la tarea de sincronización con el sistema líder, además de las técnicas de análisis cualitativo, puede

utilizarse para el diseño de los sistemas difusos el conocimiento con base en la experiencia del personal experto en los sistemas a sincronizar, datos históricos de los sistemas y técnicas estadísticas.

Para ilustrar de forma intuitiva el funcionamiento de este esquema con ganancia adaptable, conviene retomar la analogía de la parvada de patos: Imaginemos a un pato seguidor que, por alguna razón, ha quedado muy rezagado respecto al líder de la formación. En esta situación la diferencia entre ambos (el error) es grande, y el pato necesita batir sus alas con mayor fuerza para alcanzar al grupo; en términos del controlador, esto corresponde a una ganancia elevada. A medida que el seguidor se aproxima a su posición en la formación, el error disminuye y ya no requiere el mismo esfuerzo: basta con un aleteo suave para mantenerse en su lugar, lo que equivale a una ganancia baja.

Un controlador con ganancia fija sería incapaz de hacer esta distinción: aplicaría siempre el mismo esfuerzo, desperdiciando energía cuando el pato está prácticamente sincronizado, o resultando insuficiente cuando se encuentra muy lejos. El sistema de inferencia difuso, en cambio, ajusta la ganancia de manera continua siguiendo reglas tan naturales como las descritas: si el error es grande, aumenta el esfuerzo; si el error es pequeño, lo reduce.

Las funciones de membresía son precisamente las que dan forma a esta transición. En lugar de un salto brusco entre "lejos" y "cerca", definen de manera gradual qué tan grande o pequeño se considera el error, y por tanto qué tanto esfuerzo aplicar en cada situación intermedia. Decidir dónde están esos límites (a partir de qué distancia conviene aletear con fuerza, o cuándo basta un ajuste leve) es donde entra el conocimiento experto: la comprensión del comportamiento de los patos (o, de forma más general, la dinámica de los sistemas a sincronizar) puede establecer estas reglas y formas de manera que la sincronización se logre de forma eficiente. De este modo, el seguidor invierte la energía justa en cada momento.

6. Conclusiones

En conclusión, los sistemas difusos son una herramienta poderosa y versátil para modelar y resolver problemas complejos ya que permiten incorporar imprecisión, incertidumbre o conocimiento que no es fácil de incluir con metodologías tradicionales de modelado. En el contexto de la solución del problema de sincronización que aquí se describe, el sistema difuso participa en el rol de controlador apoyando en determinar la ganancia apropiada con base en que tan cercano o lejano está el sistema seguidor para conseguir sincronizarse con el sistema líder. La característica de adaptabilidad en la ganancia del controlador disminuye la necesidad de realizar cambios fuera de línea y permite un aprovechamiento más responsable de los recursos de energía que el sistema seguidor puede requerir para completar la tarea de sincronización.

Utilizar como herramienta las técnicas de análisis cualitativo de sistemas dinámicos permite conocer el comportamiento que tiene el sistema dinámico con base en un modelo matemático, estudiar los comportamientos que se generan cuando se incluye un controlador en el modelo e intervenir con conocimiento de las condiciones que afectan en los comportamientos para dirigirlos o mantenerlos hacia donde se requieren, siendo garantizado desde la etapa de diseño. En el contexto de incluir el Sistema de inferencia difusa en el modelo y analizarlo, permite identificar las relaciones de parámetros de las funciones de membresía en el valor de las ganancias y en la manera en que afecta en la velocidad de la sincronización.

7. Agradecimientos
Este trabajo fue financiado parcialmente por el Tecnológico Nacional de México con los proyectos 24461.26-P, 24952.26-P y 25692.26-P.

8. Referencias

[1] Pikovsky, A., Rosenblum, M., & Kurths, J. (2002). Synchronization: A universal concept in nonlinear science. Cambridge University Press.

[2] Strogatz, S. (2004). Sync: The emerging science of spontaneous order. Hyperion Books.

[3] Chen, G., & Pham, T. T. (2001). Introduction to fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy control systems. CRC Press.

[4] Perko, L. (2013). Differential equations and dynamical systems (3rd ed., Vol. 7). Springer.

[5] Hirsch, M. W., Smale, S., & Devaney, R. L. (2012). Differential equations, dynamical systems, and an introduction to chaos (3rd ed.). Academic Press.

[6] Pereyra, F., Valencia, G., Cazarez, N., López, F., & González, B. (2019). Implementation of a distributed optimal predictive control in a quadruple tank system. IEEE Latin America Transactions, 17(1), 135–146. https://doi.org/10.1109/TLA.2019.8826700

[7] Sousa, J. M. C., & Kaymak, U. (2002). Fuzzy decision making in modelling and control (Vol. 27). World Scientific Publishing.

[8] Gaytan-Reyes, I. G., Cazarez-Castro, N. R., Cardenas-Maciel, S. L., Lara-Ochoa, D. A., & Martinez-Graciliano, A. (2017). Genetic optimization of fuzzy systems for the classification of treated water quality. En Numerical and evolutionary optimization – NEO 2017 (Studies in Computational Intelligence, Vol. 785). Springer.

[9] Prieto, P. J., & Cazarez-Castro, N. R. (2016). Aplicaciones de la inteligencia computacional en el control de robots neumáticos. Komputer Sapiens, I, 11–15.

[10] Wu, J., & Cui, P. (2024). Cooperative adaptive fuzzy control for the synchronization of nonlinear multi-agent systems under input saturation. Mathematics, 12(10), Article 1426. https://doi.org/10.3390/math12101426

[11] Roosileht, M. (2025). Application of fuzzy logic for collaborative robot control. Electronics, 14(20), Article 4029. https://doi.org/10.3390/electronics14204029

[12] Lekkas, S., & Mikhailov, L. (2010). Evolving fuzzy medical diagnosis of Pima Indians diabetes and of dermatological diseases. Artificial Intelligence in Medicine, 50(2), 117–126. https://doi.org/10.1016/j.artmed.2010.05.007

[13] Srivastava, A., Bhanot, D., Jasim, L. H., Varshney, N., & Patil, V. (2025). Advancements in fuzzy logic applications for diagnostic decision support systems in healthcare. Fuzzy Information and Engineering, 17(3), 284–297. https://doi.org/10.26599/FIE.2025.9270064

[14] Ayllon-Lorenzo, P. M., Cardenas-Maciel, S. L., & Cazarez-Castro, N. R. (2017). Applying control theory to optimize the inventory holding costs in supply chains. En Numerical and evolutionary optimization – NEO 2017 (Studies in Computational Intelligence, Vol. 785). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96104-0

[15] Zhu, Z.-Y., Zhao, Z.-S., Zhang, J., Wang, R.-K., & Li, Z.-Q. (2020). Adaptive fuzzy control design for synchronization of chaotic time-delay system. Information

Sciences, 535, 225–241. https://doi.org/10.1016/j.ins.2020.05.056

[16] Márquez-Vera, C. A., Márquez-Vera, M. A., Yakoub, Z., Ma'arif, A., Castro-Montoya, A. J., & Cazarez-Castro, N. R. (2022). Fuzzy state feedback with double integrator and antiwindup for the Van de Vusse reaction. Archives of Control Sciences, 32, 383–408. https://doi.org/10.24425/acs.2022.141720

[17] Chen, G., & Pham, T. T. (2005). Introduction to fuzzy systems. CRC Press.

[18] Pulido-Luna, J. R., López-Rentería, J. A., & Cazarez-Castro, N. R. (2021). Mamdani-type fuzzy-based adaptive nonhomogeneous synchronization. Complexity, 2021, 1–11. https://doi.org/10.1155/2021/6613231

[19] Zaqueros-Martinez, J., Rodriguez-Gomez, G., Tlelo-Cuautle, E., & Orihuela-Espina, F. (2023). Fuzzy synchronization of chaotic systems with hidden attractors. Entropy, 25(3), Article 495. https://doi.org/10.3390/e25030495

[20] Boulkroune, A., Boubellouta, A., Bouzeriba, A., & Zouari, F. (2025). Practical finite-time fuzzy synchronization of chaotic systems with non-integer orders: Two chattering-free approaches. Journal of Systems Science and Systems Engineering, 34(3), 334–359. https://doi.org/10.1007/s11518-024-5635-7

[21] Helmy, S., Magdy, M., & Hamdy, M. (2022). Control in the loop for synchronization of nonlinear chaotic systems via adaptive intuitionistic neuro-fuzzy: A comparative study. Complex & Intelligent Systems, 8, 3437–3450. https://doi.org/10.1007/s40747-022-00677-x

[22] Wang, R.-M., Zhang, Y.-N., Chen, Y.-Q., Chen, X., & Xi, L. (2020). Fuzzy neural network-based chaos synchronization for a class of fractional-order chaotic systems: An adaptive sliding mode control approach. [18] Helmy, S., Magdy, M., & Hamdy, M. (2022). Control in the loop for synchronization of nonlinear chaotic systems via adaptive intuitionistic neuro-fuzzy: A comparative study. Complex & Intelligent Systems, 8, 3437–3450. https://doi.org/10.1007/s40747- 022-00677-x

[19] Wang, R.-M., Zhang, Y.-N., Chen, Y.-Q., Chen, X., & Xi, L. (2020). Fuzzy neural network-based chaos synchronization for a class of fractional-order chaotic systems: An adaptive sliding mode control approach. Nonlinear Dynamics, 100(2), 1275–1287. https://doi.org/10.1007/s11071-020-05574-x Nonlinear Dynamics, 100(2), 1275–1287. https://doi.org/10.1007/s11071-020-05574-x

Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Desarrollo de solucionador basado en gemelos digitales para simulación y control de brazo robótico Dorna®

Development of a digital twin-based solver for simulation and control of the Dorna® robotic arm

Elizalde-Vega, Á.D.[1], Bringas-Posadas, D.[2], Cruz-González, C.E.[3], Guzmán-Flores, I.[4]*, Velázquez-Mora, R.[4]

[1] Posgrado interinstitucional CIDESI. Av. Playa, Av. Pie de la Cuesta 702-No. 702, Desarrollo San Pablo, 76125 Santiago de Querétaro, Qro.
[2] Dirección de Ingeniería Especializada. CIDESI. Av. Playa, Av. Pie de la Cuesta 702-No. 702, Desarrollo San Pablo, 76125 Santiago de Querétaro, Qro. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0371-6384.
[3] CIDESI-CENTA. Tecnologías Aeronáuticas. Aeropuerto internacional de Querétaro. 76278 Colón, Querétaro. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7620-9052.
[4] Facultad de Sistemas UAdeC. Ciudad Universitaria, Fundadores Km 13, Zona Centro, 25350 Arteaga, Coah. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1171-8291*, https://orcid.org/0000-0003-3661.
a.elizalde@posgrado.cidesi.edu.mx; dario.bringas@cidesi.edu.mx; ecruz@cidesi.edu.mx; isidroguzman@uadec.edu.mx*; rvelazquezmora@uadec.edu.mx

Innovación tecnológica: Se está desarrollando un marco de trabajo basado en gemelos digitales para planificar actividades de fabricación y optimizar los procesos de toma de decisiones.

Área de aplicación industrial: Sectores de salud públicos y privados centrados en actividades de fabricación.

Recibido: 23 octubre 2025
Aceptado: 22 abril 2026

Abstract

Globally, manufacturing activities are migrating towards more complex strategies, which include digitalization for real-time decision-making in process and plant operations. In this context, current technology is being revolutionized to generate digital twins (DTs) that allow for the modification of manufacturing activities and their analysis for rapid optimization. This is because these activities have a profound impact on a country' seconomy through associated economic sectors such as logistics, technology development, and new business processes. Plant analysis software is generally expensive and depends on licensing, which is prohibitive for many entities, thereby limiting appropriate decision-making and increasing associated costs. In this regard, this work presents the development of a solver for simulation software for flexible production lines based on DTs. This was achieved through the digitalization of a Dorna® robot, the development of a

PyBullet environment, a graphical interface, and a comparison between the digitalized and physical robots through visual inspection and statistical analysis. The results suggest that a concordance between the physical and digital models occurred, which was verified through observations of the interaction between the physical and digital robots. Additionally, a statistical linear regression analysis was performed, revealing a correlation of approximately 99% between the physical and digital robot movements. This suggests a statistical agreement between the physical and digital robots. Therefore, these results indicate that the models, compared visually and statistically, exhibited strong agreement, suggesting an accurate correlation between the physical and digital phenomena. Finally, the development of a solver for simulation software for flexible production lines based on DTs promotes and encourages the creation of low-cost solutions for analyzing manufacturing systems. This will foster solutions for digital manufacturing in open-source software environments and the creation of cutting-edge technology based on digital manufacturing principles.

Keywords: Manufacturing, Digital twin, Robotic arm, Intelligent system.

Resumen

En la actualidad, las actividades de manufactura están migrando hacia estrategias más complejas que incluyen digitalización para la toma de decisiones en tiempo real. En ese sentido, la tecnología actual se está revolucionando para la generación de gemelos digitales (GD) que permitan la modificación de actividades de manufactura y su análisis para el fortalecimiento del mismo. Esto, debido a que dichas actividades tienen un profundo impacto en la economía de un país debido a que genera actividades económicas como logística, desarrollo de tecnología y nuevos procesos. Los softwares de análisis de planta, son por lo general costosos y dependen de licenciamientos que en muchos entes no son permisibles. En ese sentido este trabajo, presenta el desarrollo de un solucionador para un software de simulación para la línea de producción flexible basado en GDs. Lo anterior, mediante la digitalización de un robot Dorna®, el desarrollo de un ambiente PyBullet, una interfaz gráfica y una comparación entre el robot digitalizado y el físico. Los resultados, sugieren que existe una concordancia entre los modelos físico y el digital que pudo verificarse mediante observaciones de la interacción del robot físico y digital. Adicionalmente, se realizó un análisis estadístico de regresión lineal, cuya correlación entre los movimientos del robot físico y digital fueron de alrededor del 99%. Lo anterior, sugiere una concordancia estadística entre el robot físico y el robot digital. Por lo tanto, estos resultados apuntan que los modelos comparados visual/estadísticamente poseen una buena concordancia y sugieren que existe un valor de correlación correcto entre los fenómenos (físico y digital). Finalmente, el desarrollo de solucionador para un software de simulación para la línea de producción flexible basado en GD, promueve e impulsa la creación de soluciones de bajo costo para analizar sistemas de manufactura. Así, impulsar soluciones sobre manufactura digital en ambientes de software libre y la creación de tecnología de punta.

Palabras clave: Manufactura, Gemelo digital, Brazo Robot, Sistema Inteligente.

1.0 Introducción

La economía, es una ciencia social que estudia como las sociedades, personas, compañías interactúan para que, mediante la gestión de recursos limitados, puedan satisfacer sus necesidades (Secretaría de medio ambiente CDMX, s.f.). Una de las actividades con mayor impacto en la economía de un país es la manufactura, ya que transforma materias primas en productos que generar riqueza, empleo e impulsan la innovación tecnológica (ONUDI, 2021). Tal es así, que esta actividad representa alrededor del 20% del Producto Interno Bruto (PIB) de México e impulsa su crecimiento económico de forma sostenida (STATISTA, 2024).

Como se mencionó en el primer párrafo, el uso de recursos de forma eficiente ha llevado generar técnicas de optimización y la manufactura no es la excepción. La optimización de la manufactura busca la mejora continua de los procesos para aumentar la eficiencia, reducir costos y desperdicios (London Consulting Group, 2024). La optimización de proceso sirve para analizar el flujo de trabajo, materias primas, herramientas, maquinaria, eliminando cuellos de botella; así, mejorar los flujos de trabajo y reducir los ciclos de trabajo (Flores, 2024).

En la actualidad, existen los sistemas de manufactura flexible (SMF) que incrementan la productividad ya que permiten una rápida adaptación a cambios en las demandas y optimizando los de recursos empleados. Por lo tanto, se puede esperar un mayor rendimiento, reducción de costos e incremento en la eficiencia de un proceso u organización (Salvagnini, 2024). Los SMF, incluyen estaciones de trabajo en serie, manipulación automatizada y un sistema de control informático que les permiten una reacción veloz. La agilización de un proceso involucra cambios que puede ser graduales o radicales y la participación de un grupo interdisciplinario, no solo de cambios en reformas de negocio (Kosky, Balmer, Keat, & Wise, 2021).

En la actualidad, existe un mercado valuado en 3900 millones de dólares en el desarrollo de software y se proyecta que crecerá hasta el 2027 a un ritmo de alrededor de 6% anual (Ramirez, 2025). La inversión en softwares en actividades de manufactura puede variar de cientos a miles de dólares y sus aplicaciones van desde captura de datos, monitoreo y optimización de procesos (Salado-Morales, s.f.). Con la aparición de la industria 4.0 (I4.0), el 56% de la industria está implementando técnicas de manufactura inteligente, empleando sistemas baja escala, 20% a gran escala y el resto planificando inversiones (Rockwell Automation, 2025). En ese sentido, se puede vislumbrar que el desarrollo de software en procesos de optimización, manufactura digital usando gemelos digitales, por mencionar algunos, podrían ser fuentes de investigaciones relevantes. A continuación, se muestran algunas que se relacionar con esta temática.

(Colledani, Yemane, Lugaresi, Borzi, & Callegaro, 2018), presentaron el desarrollo de un software para el soporte del diseño y reconfiguración de embalaje. Los autores, utilizaron su plataforma para analizar una empresa que fabricaba válvulas hidráulicas. Lo anterior, basándose en seis productos (con diferentes condiciones de proceso) y escenarios de fluctuación (cambios de demanda, nuevos productos, etc.) para simular cambios de producción. Los resultados, sugieren que los cinco escenarios analizados el que mayor demanda de producto, sin necesidad de reconfiguración a lo largo del horizonte temporal generará una diferencia del 35% del mejor (costo mayor). Por lo tanto, el óptimo no es la configuración que minimiza el costo sino la que se adapta mejor a los cambios previstos.

(Lugaresi, Aglio, Folgheraiter, & Matta, 2019), realizaron una validación de modelos digitales en tiempo real para sistemas de manufactura (SM). Los autores, realizaron un diseño experimental para conocer el efecto de las variables estudiadas sobre la respuesta (longitud del lote inicial y tamaño del intervalo) sobre dos casos. Los resultados, sugieren que los errores de contraste fueron de alrededor de 0.0084, estos son considerados pequeños por los autores. Por lo tanto, los modelos propuestos tienen una utilidad adecuada en la aplicación de la simulación de eventos discretos. Finalmente, estos modelos debieran ser utilizados en SM más complejos.

(Lugaresi, Travaglini, & Matta, 2019), construyeron un SM a escala para demostración de conceptos basado en LEGO®. Lo anterior, ya que este tipo de SM digital podría ser clave en el liderazgo de empresas al mejorar la planificación y el control de sistemas de producción son un activo. El sistema, se construyó mediante bloques de tormenta mental LEGO®, palets (rojos y verdes) de madera que representan dos tipos de productos y la transportadora (de bloque EV3 y motor). Los resultados, arrojaron niveles de confianza del 99%, así como valores P <0.001 que sugieren que se cumplen las políticas de producción estipuladas. En ese sentido, el sistema digital fue capaz de tomar una decisión para corregir una tendencia negativa y mejorar su eficiencia en seguimiento a la política programada.

De forma similar (Lugaresi, Alva, & Matta, 2021), desarrollaron modelos a escala de laboratorio de SM para probar tecnologías de simulación en tiempo real y control de producción. En este trabajo, se empleó una celda base LEGO® como la del párrafo anterior y se basó en la norma (ISA-95 Series of Standards: Enterprise-Control System Integration, 2000) así como otras normas industriales. En este trabajo, el sistema a escala reprodujo el flujo de material y lógica de control de producción como en un sistema de manufactura real. Sus resultados basados en caso de estudio sugieren que es posible evaluar modelos de producción y planeación a escala laboratorio. Lo anterior, como soporte rentable en contraste con pruebas en sistemas de manufactura a escala real.

(Fornari, y otros, 2025), publicaron un manifiesto de investigación sobre gemelos digitales en procesos de negocio. Lo anterior, ya que desde su punto de vista gracias al internet de las cosas (IoT), sensores y actuadores es posible monitorear y automatizar procesos físicos que los hacen más eficientes. Con base en lo anterior, se impulsa el paradigma del gemelo digital (GD) como una forma avanzada de gestión de procesos. En ese sentido, combinar dichos procesos físicos (por lo general de negocio) con interacciones en tiempo real promete una nueva forma de guiar las actividades de dicho proceso. Los autores, manifiestan que no es una tarea sencilla, requiere claridad en normatividad e investigaciones rigurosas, pero tendrá un impacto positivo a futuro.

(Bringas-Posadas, y otros, 2025), desarrollaron un GD de un sistema de manufactura a escala laboratorio para planificación de secuencias de producción. Los autores, desarrollaron una celda a escala que, con la incorporación de componentes impresos tridimensionalmente, crearon un ambiente que simula el ensamble de un dispositivo. Lo anterior, con base en los tiempos monitoreados de 10000 equipos que se incorporaron a las rutinas de dos brazos robóticos. Posteriormente, mediante un GD generado con el software CoppeliaSim® se replicaron las rutinas de producción con resultados satisfactorios. Adicionalmente (Bringas-Posadas, Trejo-Morales, Franco-Urquiza, & Cruz-González, 2025), propusieron el uso de técnicas estadísticas

(Shapiro–Wilk y Jarque–Bera) para análisis paramétricos en este tipo de sistemas digital-físico, esto para contribuir con la generación de procesos y normas para la generación de manufactura digital venidera.

Como pudo apreciarse en los párrafos anteriores, existe una tendencia actual para la digitalización de la manufactura, ya que esta es un importante motor económico en las sociedades. Sin embargo, esto se ve acompañado de diversos retos que van desde la normatividad y el desarrollo de los procesos de manufactura digital requeridos para que sean útiles al entorno social. Lo anterior y publicación de leyes (Diputados.Gob, 2025), genera la necesidad nacional para desarrollar software de licencia libre que mitigue gastos para los desarrolladores de tecnología (en su mayoría de centros públicos), por ende, a la sociedad y estos desarrollos puedan transferirse a la pequeña industria nacional (mediante programas y políticas) reduciendo el pago de licencias. Por lo tanto, el objetivo de este artículo es presentar el desarrollo y validación de un solucionador basado en software libre (Python/PyBullet). Adicionalmente, se generó un gemelo digital (GD) de un brazo robótico Dorna® que busca demostrar la viabilidad del desarrollo y su sincronización 1:1 entre el modelo físico y virtual. Así, sentar las bases para su futura integración en sistemas de manufactura flexible más complejos a través de un marco de trabajo digital o framework.

2.0 Metodología para el desarrollo del solucionador.

2.1 Digitalización del brazo robot Dorna®.

Con la finalidad de generar un entorno virtual que pueda ser empleado en un GD y propiciar la manufactura digital, se digitalizará el brazo Dorna® expuesto en los trabajos de (Bringas-Posadas, y otros, 2025). Para la digitalización del brazo Dorna®, se generarán los archivos URDF con base en el ensamble que el fabricante proporciona desde la siguiente referencia (DornaCAD, 2025). Una vez descargado el ensamble, se procederá la asignación de los orígenes y las articulaciones de movimiento. Posteriormente, cada junta se escala (iniciando por la base) mediante un árbol de juntas.

2.2 Desarrollo del entorno mediante software PyBullet.

El motor físico PyBullet versión 3.2.7, es un módulo que se puede cargar en Python versión 3.11.9 se usa en la simulación de eventos físicos para detección de colisiones. En este caso, se aprovechará para la generación del GD del brazo robótico de la celda de manufactura publicada por (Bringas-Posadas, y otros, 2025). Este software, permite la incorporación de archivos de formato de descripción de robot unificado (URDF) que permite enlaces, articulaciones, jerarquía, masas, inercia, colisiones, sensores y motores que son de utilidad en la construcción de los GD.

2.3 Desarrollo de la interfaz gráfica.

Con la finalidad de propiciar el movimiento del robot en el entorno virtual, se desarrollará una interfaz gráfica mediante Phyton. Esta interfaz, será de utilidad para el control del robot Dorna® (modelo físico) y el modelo digital de dicho robot. Además, mediante las pestañas “conexión”, “control individual de juntas” y “trayectorias” se podrá controlar el robot y su ambiente virtual. Lo anterior, mediante la API que el propio robot proporciona.

2.4 Pruebas de contraste del modelo físico y el virtual.

Con la finalidad de propiciar el movimiento se plantea una prueba de trayectoria en la que el modelo virtual y el modelo real ejecutara una secuencia de movimientos como si de un

ciclo de operación se tratase y se evaluaran la concordancia y fluidez entre ambos robots, lo que se busca al hacer esta prueba es que efectivamente el simulador está recreando los movimientos del robot 1:1 esto por la conexión USB del ordenador y el robot Dorna®. En ese sentido, se corrieron tres ejercicios de trayectoria simple a 1, 5 y 10 min de duración. Así, se podrían revisar paros, desviaciones o errores que pudieran ser generados por la programación o desincronización entre el modelo digital y el físico. Adicionalmente, se revisaron las posiciones 0, 120 y 109 entre los modelos físico-digital. Finalmente, se compararon las correlaciones mediante la técnica de regresión lineal para contrastar sus comportamientos y se modelara sus variaciones.

3.0 Resultados.

3.1 Brazo robot Dorna® virtual.

La Figura 1, muestra el brazo Dorna® digitalizado incluyendo sus orígenes, ejes, así como el escalamiento de sus juntas. Con el brazo digitalizado, fue posible comprobar que no hay colisiones. En contraste con un modelo CAD (contiene geometría y malla), este brazo digitalizado ya contiene los archivos URDF con los cuales ya puede operar de forma convincente en un ambiente virtual.

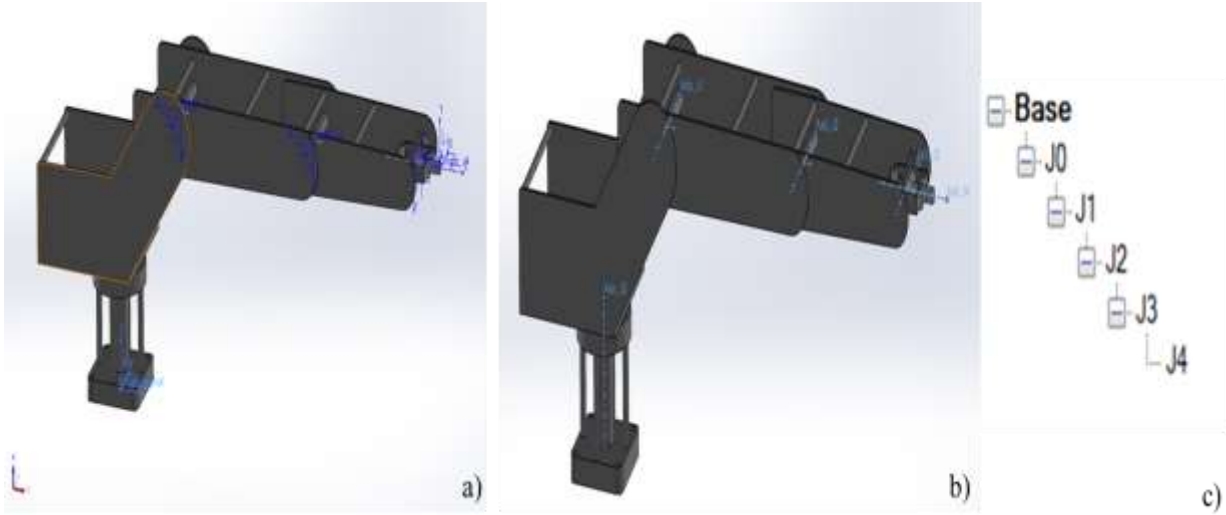


Figura 1. a) Digitalización del brazo robótico orígenes, b) Ejes y c) Escalamiento de las juntas.

3.2 Interfaz gráfica para manipulación del brazo Dorna®.

Previo a cargar el brazo digitalizado en la sección 3.1, se generó el sistema coordenado mostrado en la Figura 2. La Figura 2a, muestra el entorno y el ejemplo básicos de manual para la validación previa a cargar los URDF del brazo robótico. Además, la Figura 2b muestra el eje coordenado asignado por el PyBullet versión 3.2.7 que servirá como referencia al brazo. En ese sentido, la línea azul representa el eje Z, la roja el eje X y la verde el eje Y (todos positivos), mostrando la configuración inicial del PyBullet versión 3.2.7. En dicha configuración, se obtuvo un valor de 9.81 como fuerza al eje Z, simulando la aceleración de la gravedad en el mundo real (aproximadamente 9.81 m/s).

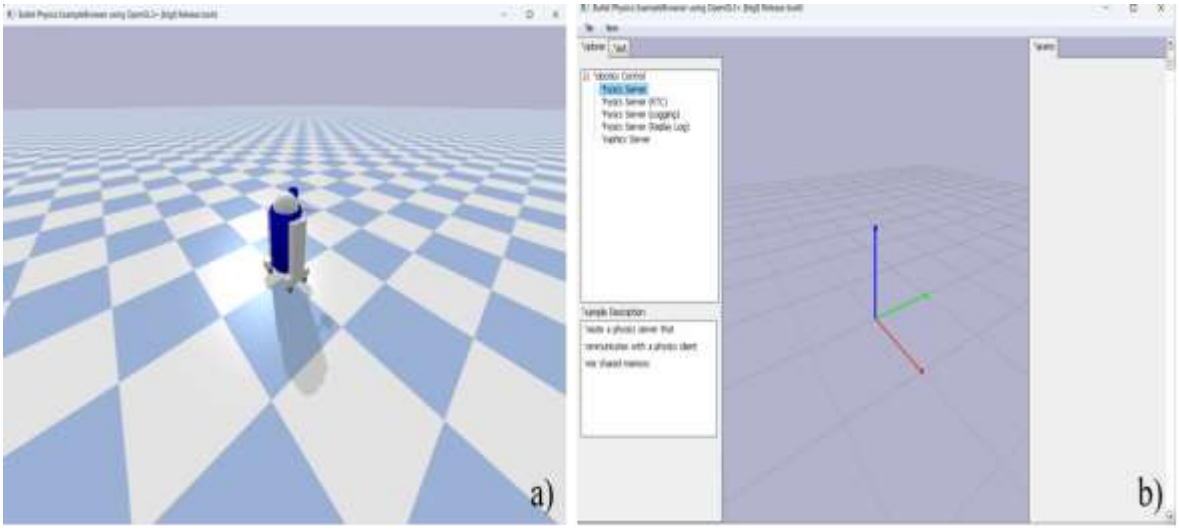


Figura 2. a) Entorno ejemplo básico de manual, b) Sistema coordenado para el desarrollo del brazo robótico Dorna® en PyBullet versión 3.2.7.

Al cargar el URDF de todos los componentes, se construye el modelo virtual mostrado en la Figura 3a, el cual es la representación digital del sistema físico (ver Figura 3b). Las pruebas, demuestran que el robot se mueve mediante la interfaz que constituye de 3 pestañas denominadas conexión, control individual de articulaciones y trayectorias. Cabe mencionar, que la pestaña conexión controla al brazo robot digitalizado mediante su API y su representación fue completa. Esta representación, incluye eslabones rígidos, articulaciones con diferentes tipos de movimiento (como rotacionales o prismáticos) y las propiedades físicas (masa, fricción, límites articulares, etc.).

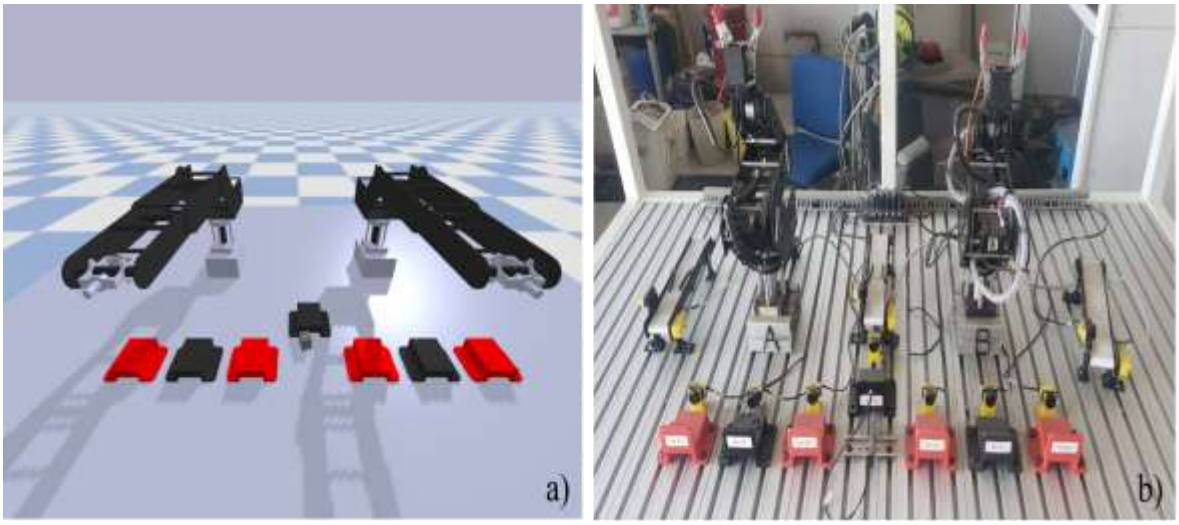


Figura 3. a) GD de dos brazos robot Dorna® y b) Sistema de manufactura a escala laboratorio (sistema físico).

La Figura 4a, muestra la interfaz para el control de los deslizadores, es notorio que al mandar a cero el brazo su representación digital cumplió la instrucción (ver Figura 4b). En ese sentido, los deslizadores establecieron las posiciones objetivo de las articulaciones. Cada deslizador, representó una articulación del robot y permite al usuario definir (en

tiempo real) el valor deseado dentro de un rango específico. Así, es posible explorar las configuraciones articulares y probar movimientos sin necesidad de escribir secuencias de comandos.

El brazo digitalizado y su interfaz, permite que el valor que el usuario ha seleccionado en el deslizador no mueva de forma directa la articulación. En su lugar, se interpreta como una posición deseada, entonces el PyBullet versión 3.2.7 activa un controlador interno —normalmente un controlador de tipo PID (Proporcional–Integral–Derivativo)— para aplicar el torque necesario que lleve la articulación hacia esa posición. En este proceso, se considera de manera realista las restricciones físicas del sistema, incluyendo la gravedad, las colisiones y la dinámica del movimiento.

Durante la simulación PyBullet versión 3.2.7 evaluó continuamente el estado del sistema, en cada paso ajustó la fuerza ejercida por los motores virtuales, minimizando el error entre la posición actual y la posición deseada. De esta forma, el sistema se comporta como si estuviera equipado con motores reales y los deslizadores funcionaron como una interfaz de alto nivel en el control de dichos motores.

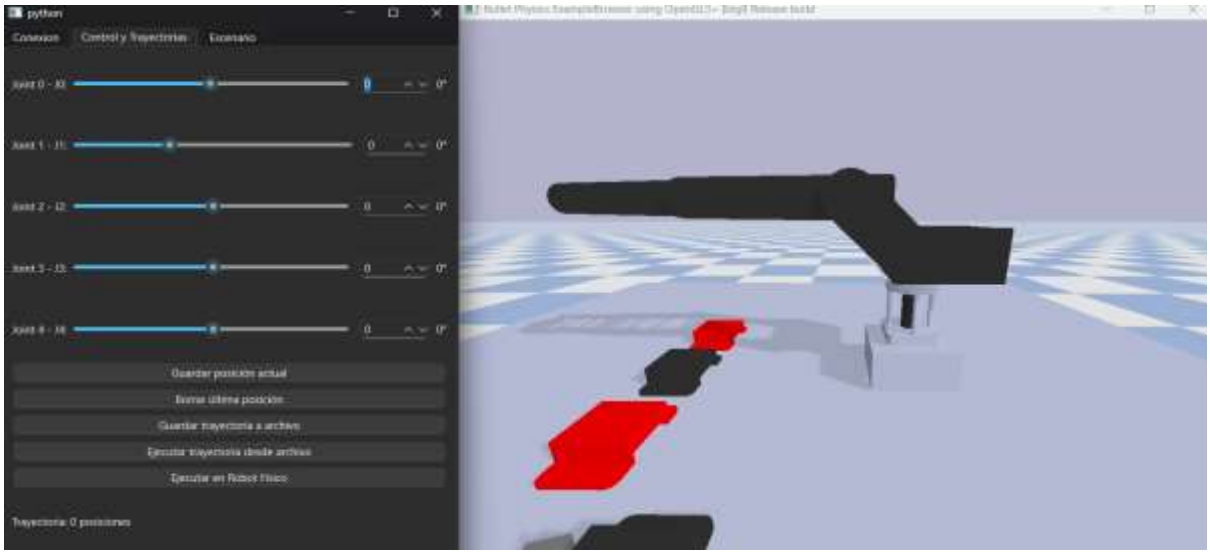


Figura 4. a) Interfaz para el control de deslizadores y control de trayectorias y b) Posición cero de uno de los brazos Dorna®.

Además, en la simulación se tiene una pestaña de “Escenario” en la que se puede visualizar todos los componentes dentro de la simulación que marca cuanto URDF hay, sus ID, y su posición dentro de las variables globales del sistema (ver Figura 5).

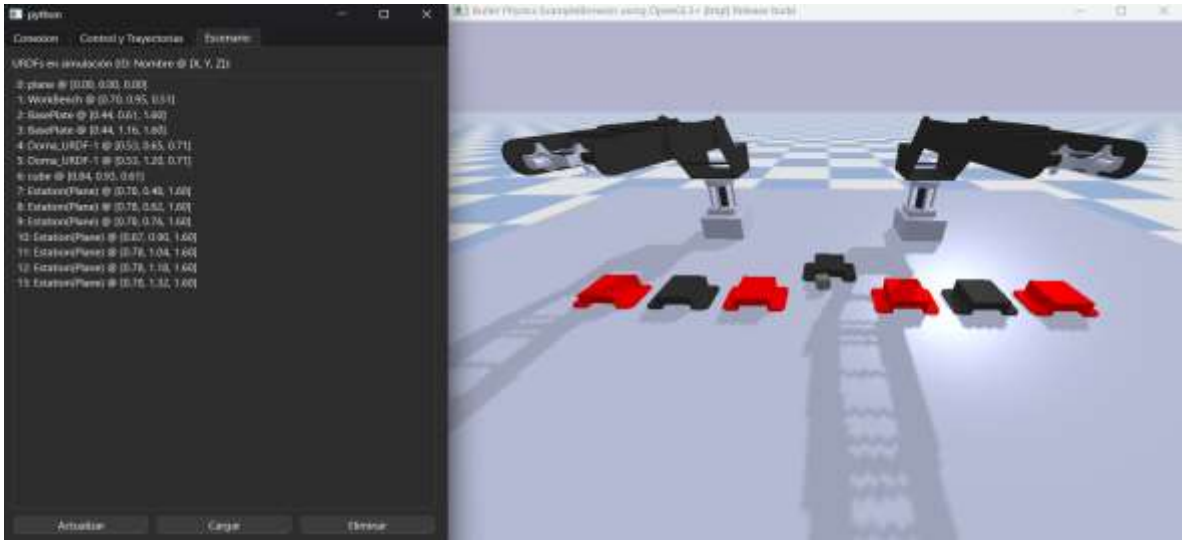


Figura 5. Muestra la pestaña de información sobre URDF activos en la simulación y su posición global con respecto al punto de origen.

3.3 Resultados de comparación de trayectorias entre el robot Físico y el Digital.

La Figura 6, muestra la trayectoria de un minuto de duración que corresponde al brazo robot realizado en este trabajo, se puede ver que los movimientos entre el brazo digital y el físico son similares. Por otro lado, las Figuras 7-8 muestran las trayectorias entre los brazos digital y físico, cuyas duraciones son 5 y 10 min, respectivamente. Es notorio, que entre mayor es el tiempo, mayor serán la cantidad de imágenes y detalle. Así, se esperaría que al comparar las posiciones ocurriese un incremento en los errores entre los brazos robóticos y digital.

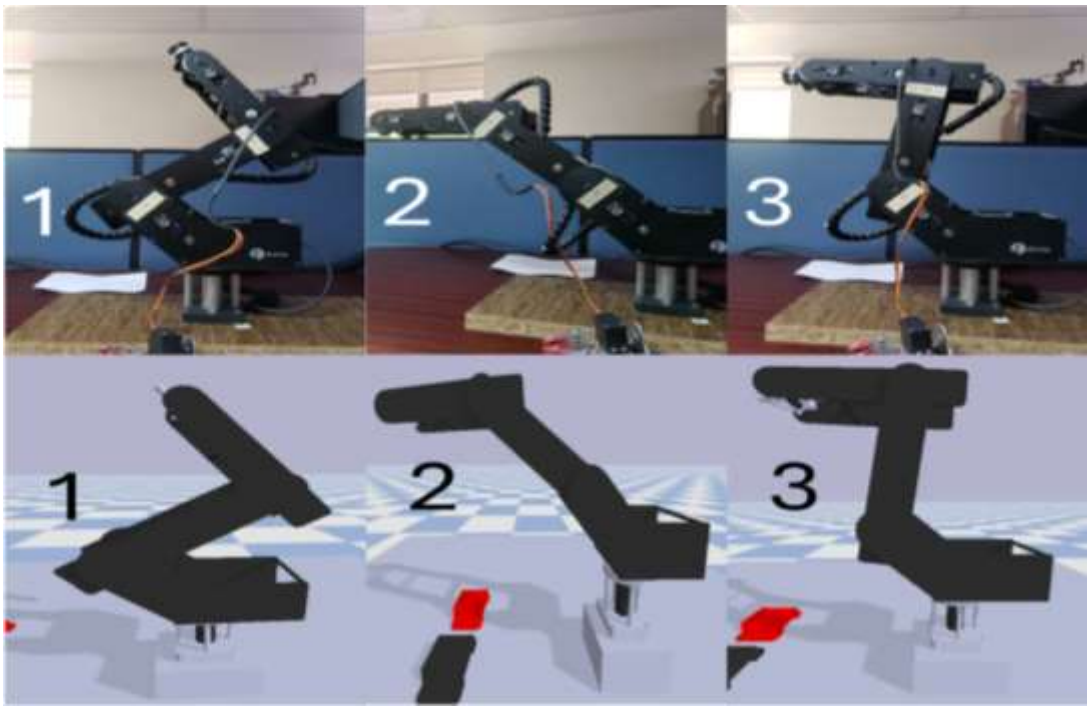


Figura 6. Posiciones de la primera trayectoria (1min) de comparación entre robot digital y físico.

La primera trayectoria (1, 5 y 10 min), generaron 293, 1408 y 2834 datos para cada uno de los tiempos considerados dentro del experimento que representan entre el 5~10 veces respecto a la duración de 1min. En contraste, la trayectoria 2 generaron 291, 1414 y 2836 datos con una tendencia similar a la de la primera trayectoria. Finalmente, los datos generados para la última trayectoria fueron 280, 1411 y 2836 para cada tiempo.

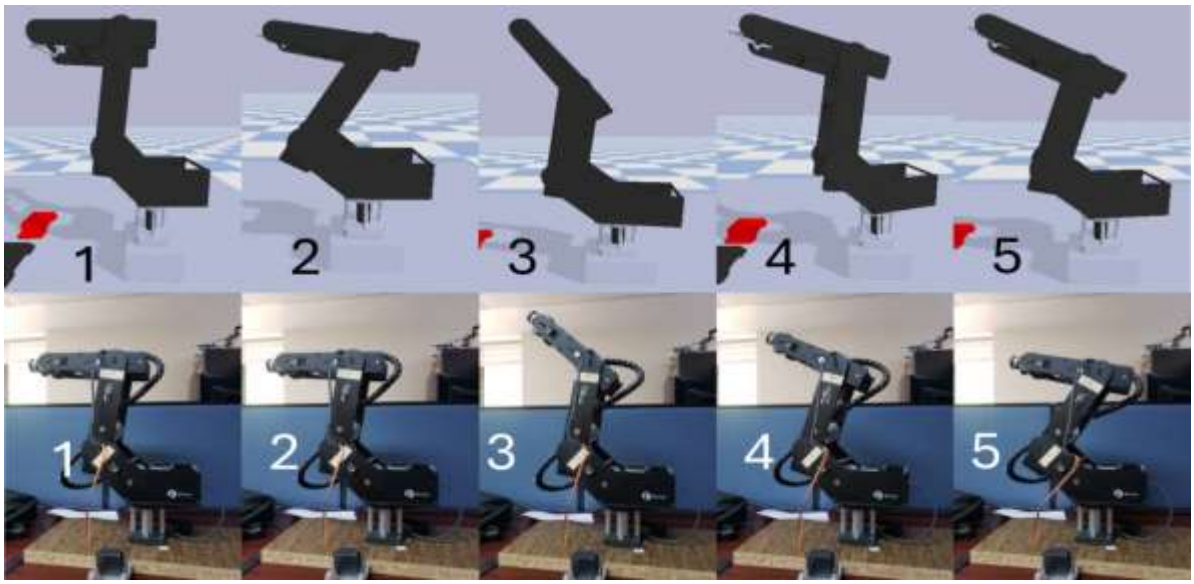


Figura 7. Posiciones de la segunda trayectoria (5min) de comparación entre robot digital y físico.



Figura 8. Posiciones de la segunda trayectoria (10min) de comparación entre robot digital y físico.

Para la prueba se realizaron las tres trayectorias antes definidas en este documento y se repitieron 3 veces con un tiempo diferente, la rutinas se ejecutaron de manera seguida durante 1, 5 y 10 minutos, se programó un script en Python versión 3.11.9 para que se obtuvieran datos de posición de ambos robots (físico y Digital) con un intervalo de tiempo de 0.2 segundos para demostrar que el valor de las juntas del robot físico es igual a su homónimo digital en todo momento durante la simulación, constatando así que el robot Físico y el Real son en efecto un Gemelo Digital. La Figura 9, muestra el comparativo para la trayectoria dos de este trabajo, como puede apreciarse existe una buena correlación lineal entre el sistema físico y el digital. En la sección 7.0, se muestra el script del solucionador de este software como referencia al lector.

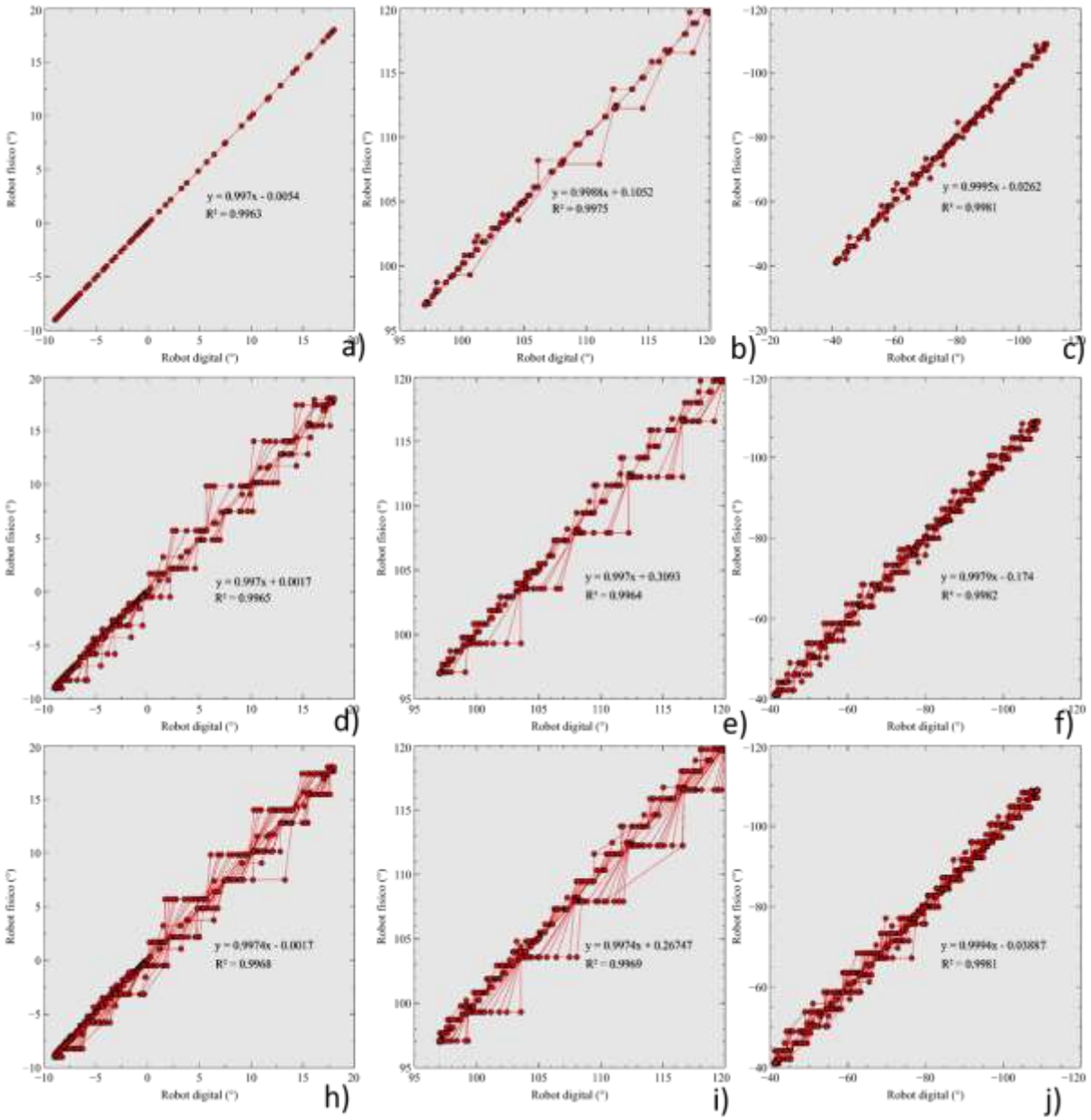


Figura 9. Comparativo en posiciones entre sistema digital y físico para a-c) 1min, d-f) 5min y h-j) 10min para la segunda trayectoria.

La Figura 9, muestra una Figura representativa del comportamiento del brazo robot físico y el digital cuyo comportamiento se rige por la ecuación $Y = m + bx$. La Tabla 1, resume los resultados de las tres trayectorias en los tres tiempos (1, 5 y 10 min) estudiados dentro de este trabajo. Como puede notarse, existe una buena correlación entre los datos del robot físico y el digital (mayor al 90% de correlación).

Tabla 1. Resultados de trayectorias y tiempos para este experimento.

No.	Trayectoria	Tiempo (min)	Posición (°)	Ecuación	R^2
1	**1**	1	-10~20	y = 0.997x - 0.054	0.9963
			95~120	y = 0.9988x + 0.1052	0.9975
			-20~120	y = 0.995x + 0.0262	0.9981
		5	-10~20	y = 0.997x + 0.0017	0.9965
			95~120	y = 0.997x + 0.3096	0.9964
			-20~120	y = 0.9979x - 0.174	0.9982
		10	-10~20	y = 0.9974x - 0.0017	0.9968
			95~120	y = 0.9974x + 0.26747	0.9969
			-20~120	y = 0.9994x - 0.03887	0.9981
3	**3**	1	-10~20	y = 0.3739x - 0.0334	0.9451
			95~120	y = 1.0007x + 0.1899	0.9993
			-20~120	y = 1.0045x + 0.1929	0.9984
		5	-10~20	y = 0.9998x - 0.0016	0.9998
			95~120	y = 0.9992x - 0.0289	0.9995
			-20~120	y = 0.999x + 0.1097	0.9993
		10	-10~20	y = 0.9974x - 0.0017	0.9968
			95~120	= 0.9974x + 0.2674	0.9969
			-20~120	y = 0.9994x - 0.0388	0.9981

4.0 Discusión

En la actualidad, se está trabajando en el desarrollo de tecnología de manufactura virtual que permita mejorar procesos y generar mejores motores para la economía (STATISTA, 2024) (ONUDI, 2021). En ese sentido, el desarrollo de este solucionador basado en Python/PyBullet (software libre) así como su DG, sugirieron una buena verosimilitud estadística ya que su valor de correlación de las trayectorias analizadas fue de alrededor $R^2 \approx 99\%$. Algo similar, fue

reportado por (Lugaresi, Aglio, Folgheraiter, & Matta, 2019) cuyos valores de error fueron de alrededor de 0.0084 entre el modelo digital y el físico. Lo anterior, sugiere que la simulación de eventos discretos entre modelos físicos y digitales es útil, así como promisoria para SM.

Adicionalmente, el desarrollo de sistemas a escala (físicos-digitales) concuerda con los trabajos presentados por (Lugaresi, Alva, & Matta, Parte A, 2021) quienes demostraron que es posible desarrollar modelos a escala (con LEGO® o celdas específicamente diseñadas) para el escalamiento de SM a nivel industrial. En dichos trabajos, se sugirió una sincronización 1:1 entre el modelo digital y el físico. Esto, permitió que el sistema digital pudiera tomar decisiones y validar los esquemas de producción de forma correcta.

También (Bringas-Posadas, y otros, 2025), presentaron un planificador de secuencias basado en CoppeliaSim® que replicó las rutinas de ensamble entre un modelo físico y su respectivo GD. Los autores, emplearon el PyBulltet y controladores PID que permitieron validar la capacidad de simulación; así como la consideración de restricciones físicas como la gravedad, colisiones y el torque. Lo anterior, para generar un desarrollo más robusto y de código abierto para generar un marco de trabajo (framework) de fácil acceso. También, mediante la aplicación de la regresión lineal para validación del sistema, pudo complementarse con la validación previa mediante estadística no paramétrica presentada por (Bringas-Posadas, Trejo-Morales, Franco-Urquiza, & Cruz-González, 2025). Así, fortalecer el desarrollo de normatividad para la generación de manufactura digital estructurada y que complemente el estándar (ISA-95 Series of Standards: Enterprise-Control System Integration, 2000).

Finalmente, tal como indicaron (Fornari, y otros, 2025), al integrar los GD en procesos de negocio y SFM, será posible mejorar la gestión de procesos con base en un paradigma avanzado focalizado en eficiencia. Cabe mencionar que la importancia de estas plataformas, no radica solo en la reducción de costos de operación, ya que es posible reconfigurar y adaptarse a demandas de trabajo variables (Colledani, Yemane, Lugaresi, Borzi, & Callegaro, 2018). Por lo tanto, el desarrollo de este solucionador sienta las bases de un marco de trabajo o framework que facilitará la transición de las pequeñas y medianas empresas (PyMEs) hacia la digitalización de su manufactura con soluciones de bajo costo y funcionales. También, es posible la integración de sensores de corriente en un brazo robótico para calcular esfuerzos en los servomotores y mediante el uso del GD calcular la probabilidad de falla por desgaste y prevenirlo antes de que suceda. Otra posibilidad, es la creación de un entorno de entrenamiento de operadores para programación de un brazo robotizado. Así, sería posible reducir la probabilidad de un daño al equipo y al usuario al evitar colisiones. Esta aplicación, podrá ser utilizada para optimización de trayectorias de producción y control de calidad mediante sistemas de visión artificial. Finalmente, aunque esta aplicación está pensada para pequeñas industrias, no es limitativo su uso a empresas más grandes. Sin embargo, los autores consideran que la puerta de apertura sería las pequeñas empresas, quienes serían beneficiadas en su economía y el desarrollo retroalimentado en un entorno real de operación robusta.

5.0 Conclusiones

Con base en los resultados y discusión, es posible concluir que el desarrollo de un solucionador con base en PyBullet versión 3.2.7 para un brazo robótico Dorna® sugiere

que es posible alcanzar una buena correlación entre el modelo digital y el físico. Esto, podrá sentar las bases para el desarrollo de marcos de trabajo (framework) basados en estadística para generar esquemas de manufactura digital confiables. Dado que el uso de GD generará secuencias de planificación y control de producción eficaces, el uso de este tipo de solucionador permitirá complementar metodologías de validación en tiempo real. Además, la integración de análisis estadístico en la validación de la interacción estos entornos permitirán al fortalecimiento de la normatividad relacionada y el fortalecimiento de la manufactura nacional. Todo lo anterior, sugirió que mediante el uso de software libre es posible desarrollar solucionadores como alternativa técnica válida (sincronización visual y estadística). Así, reducir costos de licenciamiento derivado de las marcas de software especializado y comercial.

6.0 Agradecimientos

A la secretaría de ciencia y humanidades por su apoyo y beca.

7.0 Referencias

Bringas-Posadas, D., Devillet-Castellanos, H. D., Cruz-González, C. E., Vargas-Arista, B., Guzmán-Flores, I., & Franco-Urquiza, E. A. (2025). Development of a digital twin and lab-scale manufacturing system for production sequences planning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 136*, 5515–5530.

Bringas-Posadas, D., Trejo-Morales, A., Franco-Urquiza, E. A., & Cruz-González, C. E. (2025). Exploratory statistical analysis for decision-making in a scaled manufacturing system of medical equipment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 138*, 555–568.

Colledani, M., Yemane, A., Lugaresi, G., Borzi, G., & Callegaro, D. (2018). A software platform for supporting the design and reconfiguration of versatile assembly systems. *Procedia CIRP, 72*, 808-813.

Diputados.Gob. (16 de 04 de 2025). Obtenido de Ley de austeridad republicana artículo 12: https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LFAR.pdf

DornaCAD. (25 de 07 de 2025). Obtenido de https://drive.google.com/file/d/19kcPUnuemhYqBeXViNxjs8llj91vV8vv/view

Flores, L. (19 de 01 de 2024). *Tres claves para optimizar procesos [Manufactura 4.0]*. Obtenido de Tesselar: https://www.tesselar.mx/blog/tres-claves-para-optimizar-procesos-manufactura-4.0#:~:text=1.,e%20informes%20en%20tiempo%20real.

Fornari, F., Compagnucci, I., De Donato, M. C., Bertrand, Y., Beyel, H. H., Carrión, E., . . . Valderas, P. (2025). Digital Twins of Business Processes: A Research Manifesto. *Internet of Things, 30*, 1-14.

ISA-95 Series of Standards: Enterprise-Control System Integration. (2000). International Society of Automation.

London Consulting Group. (04 de 06 de 2024). Obtenido de Como optimizar los procesos de manufactura: https://londoncg.com/blog/como-optimizar-los-procesos-con-un-sistema-de-manufactura#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20la%20optimizaci%C3%B3n%20de,de%20producci%

C3%B3n%20en%20una%20empresa.

Lugaresi, G., Aglio, G., Folgheraiter, F., & Matta, A. (2019). Real-time Validation of Digital Models for Manufacturing Systems: a Novel Signal-processing-based Approach. *2019 IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)* (págs. 450-455). Vancouver, BC, Canada: IEEE Xplore.

Lugaresi, G., Alva, V. V., & Matta, A. (2021). Lab-scale Models of Manufacturing Systems for Testing Real-time Simulation and Production Control Technologies. *Journal of Manufacturing Systems, 58*, 93-108.

Lugaresi, G., Travaglini, D., & Matta, A. (2019). A LEGO® Manufacturing System as Demonstrator for A Real-Time Simulation Proof of Concept. *Proceedings of the 2019 Winter Simulation Conference* (págs. 1-12). National Harbor, Maryland, USA: IEEE Xplore.

ONUDI. (24 de 07 de 2021). Obtenido de ¿Por que el desarrollo industrial es más importante que nunca?: https://ods9.org/news/448/por-que-el-desarrollo-industrial-es-mas-importante-que-nunca

Ramirez, O. (19 de 03 de 2025). *México, Potencia en Desarrollo de Software en América Latina*. Obtenido de Bambú Mobile: https://bambu-mobile.com/mexico-potencia-en-desarrollo-de-software-en-america-latina/#:~:text=El%20mercado%20de%20desarrollo%20de,del%206.28%25%20anual%20hasta%202027.

Rockwell Automation. (2025). Obtenido de 10.º informe anual sobre la situación de la fabricación inteligente: https://www.rockwellautomation.com/es-mx/capabilities/digital-transformation/state-of-smart-manufacturing.html?utm_source=Google&utm_medium=Paid_Search&utm_campaign=MultiInitiative_MultiIndustry_Global_ES_CMP-07522-S6S3W2&utm_term=industria%204%200&utm_co

Salado-Morales, E. (s.f.). *Los mejores software de Producción y Fabricación en 2025*. Obtenido de SoftDoit: https://www.softwaredoit.es/software-erp/software-produccion.html#:~:text=Un%20ERP%20de%20producci%C3%B3n%20permite,fabricaci%C3%B3n%20para%20optimizar%20la%20planificaci%C3%B3n.

Salvagnini. (2024). Recuperado el 27 de 03 de 2026, de La competitividad no es solo velocidad. Es sobre todo eficiencia.: https://www.salvagninigroup.com/es-ES/empresa/automatizacion-flexible#:~:text=*%20Salvagnini%20ES.%20*%20Empresa.%20*%20Automatizaci%C3%B3n%20flexible.

Secretaría de medio ambiente CDMX. (s.f.). (Gobierno de la ciudad de México) Recuperado el 24 de 07 de 2025, de Glosario definición: https://proyectos.sedema.cdmx.gob.mx/datos/glosario-definicion/Econom%C3%ADa#:~:text=Dado%20que%20los%20recursos%20del,se%20producen%20dentro%20del%20pa%C3%ADs.

STATISTA. (01 de 11 de 2024). Obtenido de La industria manufacturera en México – Datos estadísticos: https://es.statista.com/temas/7853/la-

industria-manufacturera-en-mexico/#:~:text=La%20industria%20manufacturera%20es%20la,9%2C7%20millones%20de%20trabajadores.

8.0 Anexo

Sección del script del solucionador expuesto en este trabajo.



```python
def process_motion_instruction(self, instruction):

    sys_id = instruction.get("system")
    joints = instruction.get("joint_targets", [])
    target = instruction.get("cartesian_target")
    mode = instruction.get("mode", "absolute")
    actuator = instruction.get("actuator", 0)
    delay = instruction.get("delay", 0.0)

    system = self._select_system(sys_id)
    if system is None:
        return None

    ctrl, model, sim, latency = (
        system["controller"],
        system["model"],
        system["simulated"],
        system["latency"]
    )

    is_real = ctrl and ctrl.is_available()
    t0 = time.time()

    try:
        if is_real:
            (ctrl.move_cartesian(target, mode == "absolute") if target
             else ctrl.move_joints(joints))

            if "actuator" in instruction:
                ctrl.set_actuator(bool(actuator))

            while not ctrl.is_available():
                time.sleep(0.02)

        else:
            if target:
                target = self._resolve_target(target, mode, sim)
                joints = model.inverse_kinematics(target)
                if joints is None:
                    return None
                self._simulate_cartesian_motion(sim, model, target)
            elif joints:
                self._simulate_joint_motion(sim, joints)

    except Exception:
        return None

    self._update_actuator(sim, actuator)

    if delay > 0:
        self._apply_delay(delay, is_real)

    elapsed = (time.time() - t0) + delay

    final_joints = joints
    real_pos = [None]*3
    est_pos = self._forward_estimation(model, joints)

    if is_real:
        state = self._safe_get_state(ctrl)
        if state:
            final_joints = state["joints"]
            real_pos = state["position"]

    return {
        "system": sys_id,
        "commanded_joints": joints,
        "final_joints": final_joints,
        "real_position": real_pos,
        "estimated_position": est_pos,
        "actuator": actuator,
        "latency": latency,
        "delay": delay,
        "execution_time": round(elapsed, 3),
    }
```

Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Herramienta didáctica interactiva con Arduino utilizando lógica difusa para la enseñanza de sistemas de ecuaciones lineales en Excel

An interactive didactic tool using Arduino and fuzzy logic for teaching systems of linear equations in Excel

Hernández-Miramontes, B.V.*, Serranos-Pérez, E., Soberanes-Martín, A.

Universidad Autónoma del Estado de México; Centro Universitario Valle de Chalco; C.P 56615. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-1093-5717*, https://orcid.org/0000-0003-4012-9709, https://orcid.org/0000-0002-1101-8279.

breen_vianey.71@outlook.com*; eserranop_s@uaemex.mx; asoberanesm@uaemex.mx

Innovación tecnológica: Combina tecnologías para procesar y visualizar en tiempo real sistemas de ecuaciones lineales, con gestión de la incertidumbre y gráficos dinámicos.

Área de aplicación industrial: Industria de la educación.

Recibido: 17 mayo 2025
Aceptado: 12 junio 2026

Abstract

The teaching of systems of linear equations in engineering presents challenges due to the complexity of these concepts and their limited connection to practical applications. To address this issue, this study proposes an interactive interface that integrates Arduino, fuzzy logic, and Excel to enhance understanding through dynamic and visual learning experiences. Accordingly, an interactive didactic tool was developed in which an Arduino microcontroller captures analog signals from potentiometers in real time and transmits them to Excel through Data Streamer and VBA macros. These signals are used to plot two lines in parallel with a zero-order type-1 Sugeno fuzzy logic system, which processes and stabilizes the readings, managing the uncertainty inherent in low-cost hardware.

The interface allows students to visualize variations in the x and y parameters of linear equations by physically manipulating the potentiometers. The results show that the system enabled real-time representation of variations in the linear equation parameters while maintaining a latency below 100 ms during data transmission and visualization. Furthermore, validation performed in

MATLAB demonstrated agreement between the values calculated by the fuzzy system and those obtained in Excel: a digital input of 195, a scaled value of 0.95308 V, and an output of 33.27°. Fuzzy logic improves signal stability by reducing fluctuations and provides reliable results for real-time representation.

Keywords: Educational Technology, Teaching material, Mathematics, Educational Informatics.

Resumen

La enseñanza de los sistemas de ecuaciones lineales en ingeniería presenta dificultades debido a su complejidad conceptual, además de su limitada relación con aplicaciones prácticas. Este trabajo propone una interfaz interactiva que integra Arduino, lógica difusa y Excel para fortalecer la comprensión mediante experiencias visuales y dinámicas. Por tal motivo, se desarrolló una herramienta didáctica interactiva con Arduino que captura en tiempo real las señales analógicas de potenciómetros y las envía a Excel mediante *Data Streamer* y macros en VBA. Dichas señales permiten graficar dos rectas paralelamente en un sistema de lógica difusa Sugeno de orden 0 y tipo 1, el cual procesa y estabiliza las lecturas, controlando la incertidumbre propia del hardware de bajo costo.

La interfaz permite visualizar la variación de los parámetros X y Y de las ecuaciones lineales al manipular físicamente los potenciómetros. Los resultados muestran que el sistema permitió representar en tiempo real la variación de los parámetros de las ecuaciones lineales, manteniendo una latencia inferior a 100 ms durante la transmisión y la visualización de los datos. Asimismo, la validación realizada en MATLAB muestra una coincidencia entre los valores calculados por el sistema difuso y los obtenidos en Excel: una entrada digital de 195, un valor escalado de 0.95308 V y una salida de 33.27°. La lógica difusa permite mejorar la estabilidad de las señales, reduciendo las variaciones, y proporciona resultados confiables para su representación en tiempo real.

Palabras clave: Tecnología educacional; material didáctico; matemáticas; informática educativa.

1. Introducción

El objetivo del presente trabajo describe el diseño de una interfaz interactiva para la visualización de conceptos para la enseñanza del álgebra lineal, la cual busca graficar datos de entrada en tiempo real, convirtiéndolos en coordenadas generadas a través del manejo de potenciómetros de bajo costo, por medio de estos se permite el desplazamiento de dos rectas, permitiendo la ubicación espacial dentro de un plano cartesiano ubicando las coordenadas de X y Y en un sistema de ecuaciones lineales. Si bien, dichas rectas se encuentran unidas entre sí en un plano cartesiano en Excel. Cada recta se representa mediante una ecuación de la forma $y = mx + b$. Al tener dos segmentos (rectas unidas), el punto de unión y la orientación final constituyen un sistema en el que las coordenadas (x, y) dependen de los ángulos de entrada. Por ello, se eligió trabajar con un modelo de dos grados de libertad para relacionarlo directamente con sistemas de ecuaciones $2x2$, lo que facilita su visualización en un plano bidimensional antes de escalar a sistemas de mayor complejidad.

Según Díaz Barriga & Hernández Rojas (2002) para lograr un aprendizaje significativo, es imperativo que el estudiante interactúe directamente con el objeto de estudio, lo que permite que los nuevos conceptos de sistemas de ecuaciones se anclen en estructuras cognitivas previas mediante la manipulación física y la observación de resultados en tiempo real.

1.1 Problemática de la enseñanza del álgebra lineal

La enseñanza del álgebra lineal resulta esencial para la formación inicial, ya que es uno de los cursos básicos de las carreras de Ingeniería en sistemas computacionales e Ingeniería en cómputo. Esta materia es primordial, dado que está estrechamente relacionada con otras asignaturas de semestres posteriores, como Investigación de Operaciones (Secretaría de Educación Pública, 2016). Álgebra Superior (Becerril Vilchis et al., 2019). Diversas investigaciones en los últimos años han reportado que el aprendizaje del álgebra lineal continúa representando desafíos para los estudiantes de ingeniería, debido al carácter complejo de sus conceptos y las dificultades para relacionar las representaciones algebraicas, gráficas y matriciales. Una revisión sistemática sobre sus dificultades de aprendizaje identificó que los principales problemas se centran en la comprensión de conceptos abstractos, la transición entre sus representaciones y la necesidad de incorporar tecnologías educativas que favorezcan la visualización matemática (Piñón Jiménez & Córdova Esparza, 2023).

En particular, los sistemas de ecuaciones lineales son uno de los contenidos que generan mayores dificultades conceptuales (Tashtoush et al., 2023) encontraron que los estudiantes presentan bajos niveles de comprensión conceptual respecto a los sistemas de ecuaciones lineales, especialmente al establecer relaciones entre conceptos matemáticos y al interpretar múltiples representaciones de una misma solución. Los autores destacan la necesidad de utilizar recursos didácticos que conecten las representaciones algebraicas, gráficas y matriciales para favorecer una comprensión más profunda. De manera similar, Rangel Ruiz et al. (2026) desde la teoría APOS, se menciona que los estudiantes de ingeniería abordan los sistemas de ecuaciones lineales desde una perspectiva teórica, mostrando dificultades para relacionar las representaciones algebraicas, matriciales y geométricas asociadas a los conjuntos solución.

El alcance que se pretende lograr es llegar a estudiantes de nivel superior que cursan programas de formación en ingeniería. El uso de esta interfaz busca fortalecer competencias profesionales transversales, como: a) la capacidad de modelar problemas de ingeniería mediante herramientas matemáticas; y b) el uso de tecnologías de hardware y software para resolver problemas técnicos (Wong et al., 2022). Si bien, como mencionaron Jara Ulloa & Casillas Alcalá (2024) a raíz de la contingencia ocasionada por la Covid-19, el uso de dispositivos móviles y de recursos educativos digitales se incorporó como práctica habitual. Esta situación obligó a los docentes a incorporar tecnologías en sus actividades educativas, lo que generó la necesidad urgente de desarrollar y reforzar sus competencias digitales.

En tal sentido, enseñar a las nuevas generaciones implica que es fundamental que los docentes universitarios integren tecnologías actuales en el proceso de enseñanza, dado que los estudiantes cuentan con un amplio acceso a la tecnología y pueden aprovecharla con fines didácticos (Costa & Rossignoli, 2017). Por otro lado, partiendo de la tecnología se puede mejorar la técnica del

docente en los procesos de enseñanza y el aprendizaje en comparación del tradicional (Gamboa, 2007), como herramienta de apoyo el uso de software en la educación se ha vuelto relevante en el proceso de enseñanza y aprendizaje de las matemáticas, ya que en cuanto al algebra lineal sigue siendo complejo para los estudiantes, como señala Ponce Silva (2017), el aprendizaje del álgebra lineal en las carreras de ingeniería se ve obstaculizado por la desconexión entre los métodos de enseñanza tradicionales y las aplicaciones prácticas, lo que genera una barrera en la comprensión de sistemas de ecuaciones lineales.

1.2 Fundamentación pedagógica

En el contexto de la educación superior, esta propuesta se alinea con el modelo TPACK (*Technological Pedagogical Content Knowledge*) propuesto por Salas-Rueda (2019), este marco permite que la tecnología (Arduino y Excel) no sea un elemento aislado, sino que se integre con el conocimiento disciplinar del álgebra lineal y con el conocimiento pedagógico, lo que facilita la transición de conceptos abstractos a representaciones gráficas dinámicas. Esta integración es vital para desarrollar competencias profesionales en los estudiantes de ingeniería, como el diseño de instrumentación y la resolución de problemas técnicos, superando el enfoque meramente disciplinar de los niveles educativos previos Zarzar Charur, 2015).

Asimismo, la implementación en el aula universitaria requiere estrategias didácticas específicas que fomenten la participación. Navaridas Nalda (2004) señala que las estrategias que involucran medios tecnológicos permiten una mayor flexibilidad en la enseñanza, mientras que Zarzar Charur (2000) destaca la importancia de la didáctica grupal; en este sentido, el prototipo permite que los estudiantes colaboren en la experimentación y discutan las variaciones de las rectas al manipular los sensores.

1.3 Tecnologías aplicadas a la enseñanza del álgebra lineal

Las instituciones educativas en el área de ingeniería buscan mejorar la enseñanza y aprendizaje del álgebra lineal y han optado por utilizar software para enseñar conceptos matemáticos.

El departamento de Teoría Económica y Economía Matemática de la UNED (Universidad Nacional de Educación a Distancia), llevó a cabo el análisis y la representación gráfica de funciones matemáticas con Excel (Palencia González & García Llamas, 2017). En esa misma línea tecnológica, Ruiz Ledezma et al. (2022) describen un dispositivo digital interdisciplinar que integra Arduino, NetLogo, Microsoft Excel y GeoGebra para la recolección y el modelado en tiempo real de datos físicos, así como para su interpretación matemática. En conjunto, con esta propuesta ambos demuestran la versatilidad de Arduino como puente entre lo físico y el modelado matemático y subrayan el valor de las hojas de cálculo como entornos accesibles para la enseñanza. Mientras que el trabajo de Ruiz Ledezma et al. (2022) se orienta al tratamiento de conceptos de física mediante simulación y modelado en NetLogo y GeoGebra, la herramienta didáctica amplía este enfoque al integrar la lógica difusa como mecanismo de estabilización de los datos. De este modo, ambas propuestas coinciden en su propósito didáctico de acercar las tecnologías a los contextos educativos y de promover la conexión entre teoría y práctica. La integración de recursos visuales e interactivos, como señalan Jiménez y Lahuerta (2022), mejora la comprensión y la retención de conceptos abstractos.

1.4 Integración tecnológica: Arduino, Excel y lógica difusa

Se empleó la plataforma Arduino para capturar en tiempo real las señales analógicas generadas por los potenciómetros y transmitirlas mediante la comunicación USB (*Universal Serial Bus*), utilizando el complemento *Data Streamer* y la hoja de cálculo de Excel para su análisis y visualización. Dichas señales, al convertirse en digitales, generan incertidumbre en el hardware, lo que provoca variaciones en los datos y afecta su precisión y estabilidad al momento de su captura, lo que complica su representación en gráficos de dispersión y en macros de VBA (*Visual Basic for Applications*).

Para mitigar la incertidumbre y el ruido en la captura de señales analógicas provenientes de los potenciómetros, se implementó un sistema de inferencia difusa (Fuzzy Inference System, FIS) basado en el modelo Sugeno de orden cero. A diferencia de las funciones triangulares de membresía, se optó por funciones trapezoidales de membresía (Du & Sun, 2008). Diseñadas en el entorno de *MATLAB*, debido a que su estructura, compuesta por límite, soporte y núcleo, ofrece una región de meseta que permite controlar rangos de datos más amplios. Lo que este diseño facilita es una amplia determinación de los grados de pertenencia en comparación con la función triangular (Du & Sun, 2008) especialmente tras realizar un escalamiento de la señal en el rango de 0 a 0.5 (Morales Luna, 2002). Cabe destacar que la lógica difusa es una herramienta esencial para el tratamiento de variables que no poseen límites precisos, lo que permite un procesamiento de datos más cercano al razonamiento humano que al de la lógica binaria tradicional (Zadeh, 1965).

De igual forma, se reportó un trabajo centrado en la resolución de problemas de álgebra lineal con Excel, sin conocimientos avanzados de la hoja de cálculo. En este sentido, se destaca cómo Excel puede resolver problemas de álgebra lineal, más allá de su aplicación en tablas y en estadística. Sin herramientas avanzadas, permite resolver sistemas, y es útil para docentes y estudiantes en un contexto didáctico a nivel universitario (Rasúa López, 2003).

Ahora bien, autores como Aguirre Manríquez et al. (2022) han utilizado potenciómetros rotativos clasificados como A, B, C y W en experimentos electrónicos, donde A (50KΩ), B (10KΩ), C (10KΩ) y W (20KΩ) se trabajaron en conjunto con Arduino Uno, Proteus y MATLAB, con el objetivo de lograr una función de ajuste polinomial mediante ecuaciones para sus representaciones gráficas, obteniendo como resultado la simulación en Proteus de las funciones A-logarítmico, B-lineal, C-antilogarítmico y W-logarítmico-antilogarítmico. En donde, a modo de conclusión, los autores recomiendan realizar ajustes de curva para mejorar la señal de control en sistemas electrónicos.

En este caso, la manipulación física de potenciómetros permite que conceptos abstractos, como las pendientes de una recta o la intersección de un sistema de ecuaciones, se transformen en experiencias tangibles y visuales en tiempo real. La literatura reciente respalda esta integración; por ejemplo, el uso de hojas de cálculo se ha demostrado una herramienta accesible y potente para la modelación de fenómenos físicos y la resolución de problemas matemáticos, sin requerir software especializado de alto costo (Palencia González & García Llamas, 2017; Rasúa López 2003)

1.5 Aportación de la propuesta

En comparación con la propuesta anterior, se observan diferencias importantes respecto de los estudios (Palencia & García, 2017; Ruiz

et al., 2022; Rasúa, 2003) que emplean Excel para el aprendizaje del álgebra lineal. En este trabajo se integra Arduino porque ofrece una integración educativa y una integración directa con Excel, ya que cuenta con el complemento Data Streamer, lo cual facilita su implementación. Además, cuenta con una amplia comunidad para resolver dudas y bibliotecas para principiantes, en contraste con una tarjeta como la STM32, que requiere un conocimiento más técnico. Esto permite al estudiante adquirir una experiencia práctica e interdisciplinaria, en comparación con los enfoques basados únicamente en software, y le brinda un contexto de aplicación.

La interfaz interactiva pretende reforzar los conocimientos teóricos, como la ubicación espacial en un plano cartesiano, y brindar a los estudiantes de ingeniería una experiencia educativa enriquecedora. De acuerdo con Aspiazu Hidalgo et al. (2024) las asignaturas del área de matemáticas requieren recursos educativos tecnológicamente innovadores y de fácil acceso. Al integrar la tecnología con conceptos matemáticos fundamentales. Ahora bien, como se indica actualmente, la educación superior ha enfrentado diversos desafíos en la enseñanza del álgebra lineal, principalmente porque gran parte de los estudiantes la percibe como una materia difícil y abstracta. Esta situación ha impulsado el desarrollo de propuestas innovadoras orientadas a mejorar la comprensión y el interés por los contenidos esenciales de la asignatura.

La integración de herramientas tecnológicas en la enseñanza del álgebra lineal no es solo una cuestión de actualización técnica, sino que responde a la necesidad de superar la comprensión de conceptos abstractos que caracteriza a esta disciplina. Desde una perspectiva pedagógica, esta propuesta se fundamenta en el constructivismo, que sostiene que el conocimiento se construye activamente cuando el estudiante interactúa con el objeto de estudio (Piaget, 1977; Schunk, 2012). Es importante señalar que el alcance del presente trabajo se centra en el diseño, la implementación y la validación técnica de una herramienta didáctica interactiva basada en Arduino, Excel y lógica difusa para la visualización de sistemas de ecuaciones lineales. Si bien la propuesta se fundamenta en principios pedagógicos orientados al aprendizaje y a la interacción con conceptos matemáticos, en esta etapa no se realizó una evaluación educativa formal con los estudiantes. Por tanto, los resultados reportados corresponden a la funcionalidad técnica, la estabilidad y la viabilidad de la herramienta como recurso de apoyo para la enseñanza, quedando como trabajo futuro la evaluación de su impacto en la comprensión conceptual, el aprendizaje y el desarrollo de competencias en estudiantes de ingeniería.

2. Validación técnica del sistema

El presente trabajo utiliza la lógica difusa para controlar la incertidumbre y la inestabilidad propias de los potenciómetros de bajo costo empleados para convertir la señal analógica en digital. Estos dispositivos generan variaciones constantes en las señales analógicas, lo que dificulta la precisión y la estabilidad de los datos al graficarlos en Excel. Por lo tanto, la lógica difusa permite visualizar datos de lecturas inestables al aplicar reglas de inferencia y considerar variaciones continuas entre valores, evitando saltos bruscos y ofreciendo resultados confiables. Ahora bien, se define como una investigación de desarrollo tecnológico con un enfoque descriptivo. Siguiendo la ruta cuantitativa para la validación técnica Hernández Sampieri et al. (2014), la metodología se dividió en tres fases:

Fase 1: Diseño y construcción del hardware basado en la plataforma de hardware abierto Arduino.

Fase 2: Programación del sistema de inferencia difusa de tipo Sugeno en MATLAB para la estabilización de señales.
Fase 3: Desarrollo de la interfaz de visualización dinámica en Microsoft Excel mediante la herramienta *Data Streamer* para la recepción de datos en tiempo real.

2.1 Fase 1. Diseño y construcción del hardware

Si bien, para su funcionamiento, las pruebas se realizaron en un sistema operativo de Windows 11, haciendo uso de Microsoft Office 365 para el uso de Excel; además, su complemento *Data Streamer* y en cuando a Matlab su versión fue R2024b, utilizando el complemento *Fuzzy Logic Toolbox* eso en cuanto a la parte de software, si bien para el desarrollo del gabinete se realizó el diseño en Tinkercad se muestra en la figura 1.

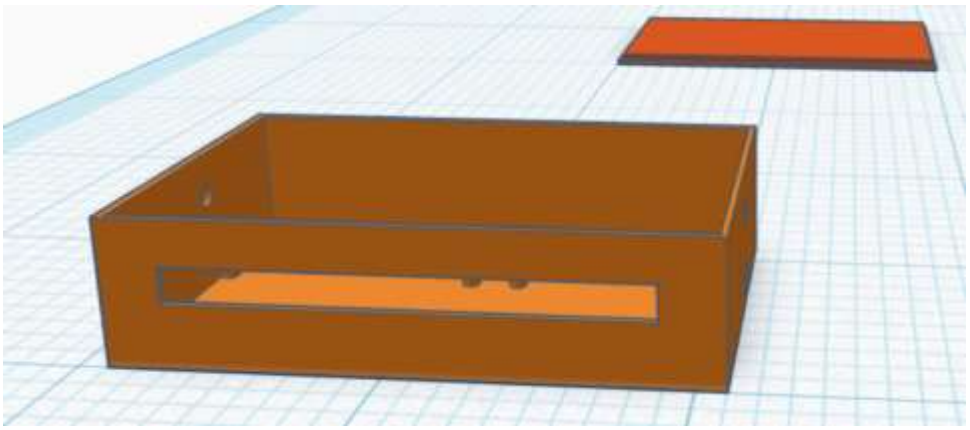


Figura 1. Diseño de gabinete para el dispositivo.
Elaboración propia.

Posteriormente, se optó por hacer uso de una tarjeta Arduino como se muestra en la figura 2 la cual es de hardware abierto, lo que facilita el acceso y el uso en la electrónica y la computación para el desarrollo de sistemas (Vidal Silva et al., 2019). Posteriormente, se desarrolló el diseño del diagrama de conectividad entre Arduino y los potenciómetros, como se muestra en la figura 3.

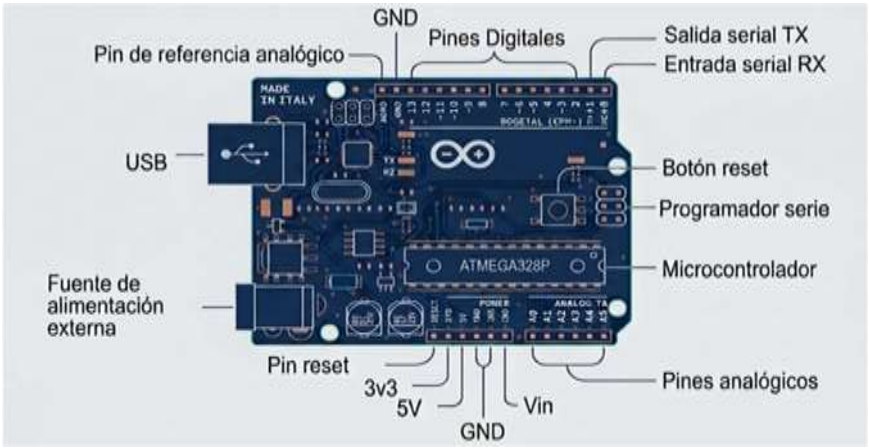


Figura 2. Diagrama esquemático de su arquitectura basado en Lineros et al. (2018). Generada por Nano Banana 2 de Gemini IA (2026). Elaboración propia.

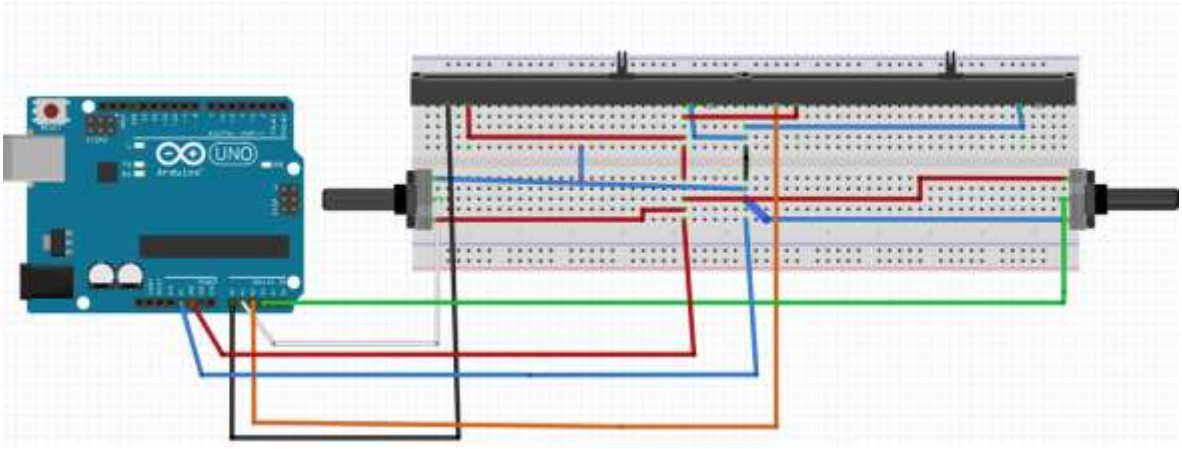


Figura 3. Hardware construido.
Elaboración propia.

2.2 Fase 2. Programación del sistema de inferencia difusa

En la fase de programación, se definieron las variables del sistema difuso en MATLAB y en Excel. A continuación, se describen las variables de entrada y de salida.

Variable de entrada: Se denominó “Voltaje” y cuenta con 10 funciones de membresía del tipo trapezoidal, en función del voltaje de la señal analógica. Los parámetros de cada una de las funciones de membresía se presentan en la tabla 1 y se identifican como a, b, c y d.

Tabla 1. Variable de entrada “Voltaje” y sus funciones de membresía.

	a	b	c	d
V1	0	0.1	0.4	0.5
V2	0.4	0.5	0.9	1
V3	0.9	1	1.4	1.5
V4	1.4	1.5	1.9	2
V5	1.9	2	2.4	2.5
V6	2.4	2.5	2.9	3
V7	2.9	3	3.4	3.5
V8	3.4	3.5	3.9	4
V9	3.9	4	4.4	4.5
V10	4.4	4.5	5	5.5

Elaboración propia.

Variable de salida: Se definió con el nombre de “Angulo” y cuenta con 10 constantes que definen las regiones de interés al manipular el sistema, como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Variable de salida y sus constantes.

A1	0
A2	20
A3	45
A4	60
A5	70
A6	90
A7	135
A8	215
A9	270
A10	315

Elaboración propia.

Con las variables de entrada y salida, se crearon las funciones de membresía en el rango de 0 a 1, como se observa en la figura 4.

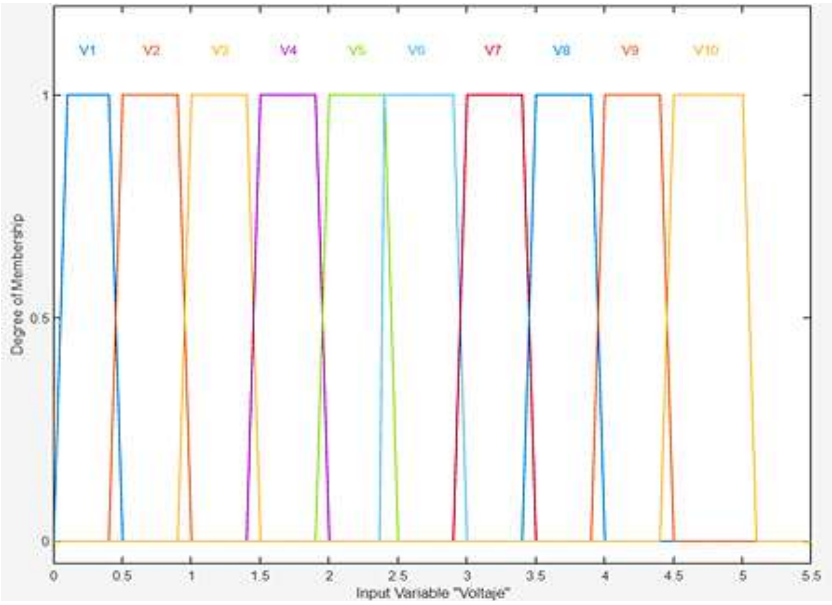


Figura 4. Funciones de membresía. Elaboración propia.

Una vez definidas las funciones de membresía de la entrada y las constantes que determinan la salida, se procedió a definir las reglas de inferencia, en las que se describe la relación entre la variable de entrada y la variable de salida, como se observa en la tabla 3. Este sistema difuso se implementó en cada uno de los cuatro potenciómetros para mejorar la visualización de los datos en el gráfico de Excel.

Tabla 3. Reglas de inferencia.

Si voltaje es **V1** entonces la salida es **A1**
Si voltaje es **V2** entonces la salida es **A2**
Si voltaje es **V3** entonces la salida es **A3**
Si voltaje es **V4** entonces la salida es **A4**
Si voltaje es **V5** entonces la salida es **A5**
Si voltaje es **V6** entonces la salida es **A6**
Si voltaje es **V7** entonces la salida es **A7**
Si voltaje es **V8** entonces la salida es **A8**
Si voltaje es **V9** entonces la salida es **A9**
Si voltaje es **V10** entonces la salida es **A10**

Ahora bien, para poder contar con la interfaz interactiva se basó en un modelo matemático de tipo difuso en Excel, el cual permite procesar señales analógicas mediante funciones de membresía y de reglas de inferencia, el cual genera salida de señales estables, procesando señales analógicas a digitales, estabilizando las señales con el objetivo de que se pueda situar correctamente la coordenada o punto dentro del plano cartesiano sin tener incertidumbre a la hora de posicionar la recta para graficar. Como tal no resuelve sistemas de ecuaciones lineales, solo actúa como un mecanismo de transformación y estabilización de parámetros que después son utilizados en la representación algebraica y gráfica de dichos sistemas lineales, es decir, se obtiene una salida difusa que da como resultado un coeficiente del sistema ejemplo: $m = f_{\text{difuso}}(V_1), b = f_{\text{difuso}}(V_2)$ lo que quiere decir que los valores matemáticos de la recta (pendiente m y ordenada b) se obtienen a través de voltajes, pero no de forma directa, sino mediante un “proceso inteligente” es decir difuso por lo tanto V_1 y V_2 representan

el voltajes que provienen de los potenciómetros (perilla o sliders) al girar un potenciómetro el voltaje cambia, ese voltaje puede ir de 0 a 5 volts. Ahora bien, para construir una recta, $y = mx + b$, donde m, es qué tan inclinada está la recta y b representa dónde corta al eje y. En tal sentido, el problema al girar los potenciómetros es que el voltaje que reciben no es preciso, presenta ruido (incertidumbre) y varía poco, aunque no se manipulen los potenciómetros. No se podría hacer algo tan simple como $m = (V_1)$, porque la recta estaría "temblando" (término coloquial para describir el ruido de las señales analógicas) al hacerlo. Por lo tanto, la función $f_{\text{difuso}}(\cdot)$ actuando como un mecanismo de "filtro inteligente" que interpreta el voltaje en términos coloquiales nombrando las variables como "bajo", "medio" y "alto" para posteriormente aplicar las reglas, como lo son si el voltaje es "bajo" la pendiente "pequeña", si es "medio" la pendiente es "moderada" y si es "alto" la pendiente es "grande" lo que da resultado y evita saltos bruscos al posicionar la recta. La primera parte de la fórmula $m = f_{\text{difuso}}(V_1)$ (función de inferencia difusa) significa que la pendiente m no se obtiene directamente del voltaje, sino interpretarlo y suavizarlo, mientras que la segunda parte $b = f_{\text{difuso}}(V_2)$ significa que el punto donde la recta cruza el eje y también se obtiene mediante ese mismo proceso inteligente. Y esto con el propósito de mostrar una representación interactiva de enseñanza en el área de matemáticas y la búsqueda de recursos interactivos en el área de alumnos de nivel superior en específico las áreas de ingeniería con el fin de relacionar la electrónica como Arduino y potenciómetros con las matemáticas como Matlab que al pasar su modelo difuso a Excel lo hace accesible sin necesidad de pagar una licencia y así el alumno podrá visualizar la representación de dos rectas. Lo cual permitió demostrar la viabilidad técnica de la integración entre Arduino y Microsoft Excel, como en el diseño de una interfaz interactiva para la representación dinámica de sistemas de ecuaciones lineales 2×2.

2.3 Fase 3. Desarrollo de la interfaz

Una vez desarrollado el modelo a seguir para visualizar las rectas, se procedió a conectar el hardware y la tarjeta Arduino al equipo de cómputo mediante el puerto USB, como se muestra en la figura 5. Se inició y configuró la comunicación serial mediante el complemento *Data Streamer* de Microsoft Excel. Permitiendo recibir en tiempo real las señales analógicas captadas por los potenciómetros y convertirlas en datos que se almacenan automáticamente en una hoja de cálculo. Por lo tanto, se estableció la conexión entre Arduino y Excel mediante el canal serial, lo que permitió la transmisión continua de los valores de las cuatro entradas analógicas del sistema. En conjunto, estos elementos constituyen la base para la adquisición, el procesamiento y la visualización de datos, lo que permite representar gráficamente el comportamiento de las rectas generadas mediante la manipulación de los potenciómetros. La Figura 6 muestra el proceso de comunicación entre la tarjeta Arduino y la hoja de cálculo utilizada para la recepción de datos en tiempo real.



Figura 5. Flujo de comunicación entre Arduino, *Data Streamer*, Excel y el sistema de lógica difusa para la visualización de datos en tiempo real. Elaboración propia.

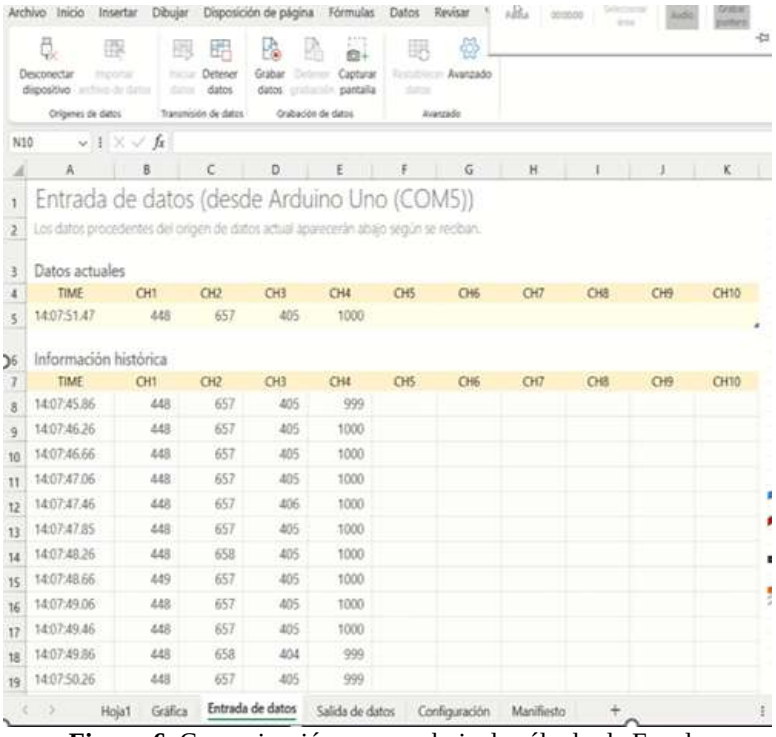


Figura 6. Comunicación con una hoja de cálculo de Excel.
Elaboración propia.

Una vez que todo estuvo conectado, se habilitó la comunicación con Excel mediante el analizador de datos. Los datos que se requieren recopilar son los que arrojan los potenciómetros al manipularlos, para convertirlos de analógicos a digitales y poder visualizarlos en Excel, interpretándose mediante el conjunto de líneas que se mueven en el plano cartesiano. Y esto se pretende al tomar cada entrada de los potenciómetros denominados CH; por lo tanto, al tener cuatro entradas, se obtienen CH1, CH2, CH3 y CH4. En la hoja de cálculo, mediante el transmisor de datos (*Data Streamer*), se capturan las cuatro señales de entrada que envía la tarjeta Arduino.

3. Métodos experimentales

En relación con los resultados de la construcción de la interfaz interactiva, al

establecer la conexión entre Arduino y Excel para la visualización de los datos en tiempo real, se midió el voltaje de entrada de los cuatro potenciómetros conectados al sistema. Cada uno de los potenciómetros generó una señal analógica que posteriormente se convirtió en digital a través del conversor analógico-digital (ADC) de la placa Arduino Uno R3, el cual cuenta con una resolución de 10 bits. Esta resolución permite convertir la señal analógica en valores digitales comprendidos entre 0 y 1023, donde 0 corresponde a 0 voltios y 1023 a 5 voltios, lo que cubre todo el rango de voltaje de entrada.

Para optimizar la interpretación de estos valores digitales, se implementó un proceso de escalamiento que consiste en agrupar los datos en rangos. Este escalamiento permitió transformar los valores digitales en un rango de 0 a 5 voltios, lo cual resulta intuitivo y adecuado para el análisis y la visualización de los datos. Para verificar y ajustar el funcionamiento del sistema de lógica difusa implementado, se utilizó la aplicación "*Fuzzy Logic Designer*" de MATLAB para simular y validar el sistema difuso (MathWorks, n.d.). Esta interfaz permitió simular y analizar la inferencia difusa a partir de los datos de entrada, asegurando que el sistema mostrara señales de salida estables ante incertidumbres o variaciones en las señales de los potenciómetros.

Como ejemplo práctico, al girar el potenciómetro situado en la primera posición se obtuvo una entrada digital de 197. Este valor se escaló a 0.95308 Volts, lo que se interpreta como un dato de salida con 3.28 grados. Al implementar el sistema difuso en MATLAB, el valor de salida obtenido es cercano al valor simulado, como se muestra en la figura 7. Este análisis comparativo validó el funcionamiento adecuado del sistema difuso y su capacidad para regular con precisión las señales de entrada.

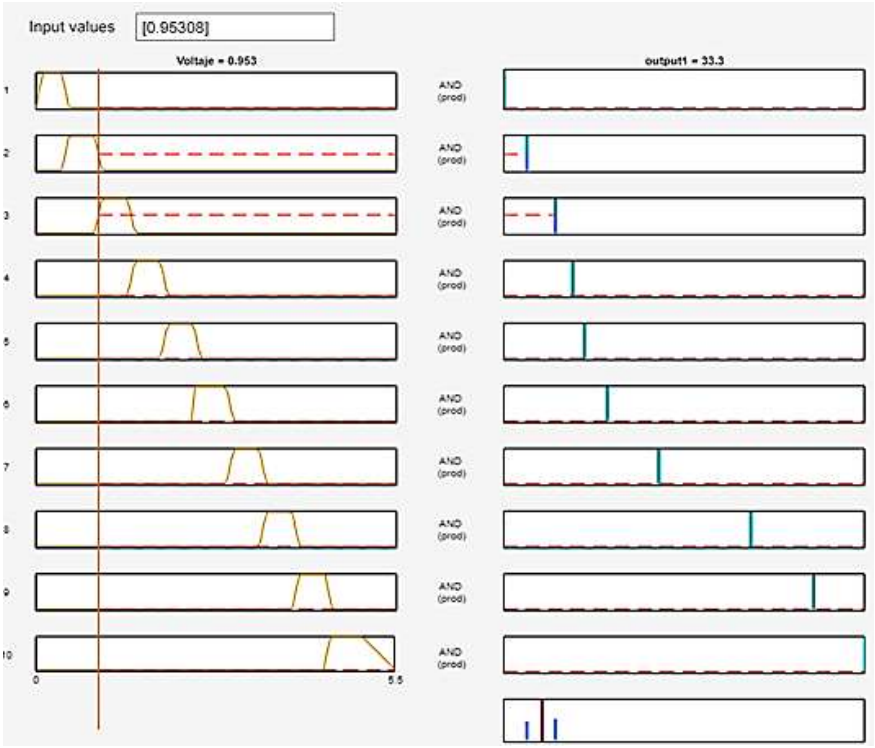


Figura 7. Verificación en el entorno de Matlab.
Elaboración propia.

Se conectó la tarjeta Arduino R3 a la hoja de cálculo mediante un complemento de Excel, cuyo transmisor de datos, Data Streamer, captura las cuatro señales de entrada provenientes de los potenciómetros que la tarjeta Arduino envía. Los datos se capturan y se almacenan en las celdas para generar un gráfico que permite visualizar en tiempo real el movimiento de las rectas en el plano cartesiano, dentro de los cuatro cuadrantes que lo componen, y controlar el ángulo y la longitud de cada recta.

4. Discusión de Resultados

Como resultado de la implementación del sistema de lógica difusa de Sugeno de orden 0 y tipo 1, se logró estabilizar el gráfico generado en Excel, lo que mejoró la visualización de los datos. El sistema permitió gestionar las señales analógicas, que, por su naturaleza, son inestables, y, al estabilizarlas, se visualizaron con exactitud los resultados obtenidos. La integración de Arduino y Excel en la interfaz didáctica ha permitido obtener datos en tiempo real con precisión y estabilidad.

4.1 Resultados obtenidos

Como se visualiza en la figura 8, en el dispositivo terminado se incorporan los diferentes componentes utilizados para el desarrollo de la interfaz. Se utilizó una caja de MDF (Medium Density Fibreboard) para montar los componentes electrónicos, para su estabilidad y facilidad de manejo. En la misma se integraron dos potenciómetros de perilla de 10 kΩ, colocados en los laterales de la caja, que permiten controlar el ángulo de cada recta, además de dos potenciómetros deslizables de 10 kΩ en la parte frontal, que permiten ajustar la longitud de cada recta. Estos potenciómetros se colocaron sobre dos placas fenólicas perforadas, lo que proporcionó una base sólida para su ubicación y conexión. Para la conexión y comunicación con una hoja de cálculo de Excel, se conectaron las entradas analógicas, el voltaje y la alimentación, y se puede monitorear en tiempo real las señales generadas por los potenciómetros.

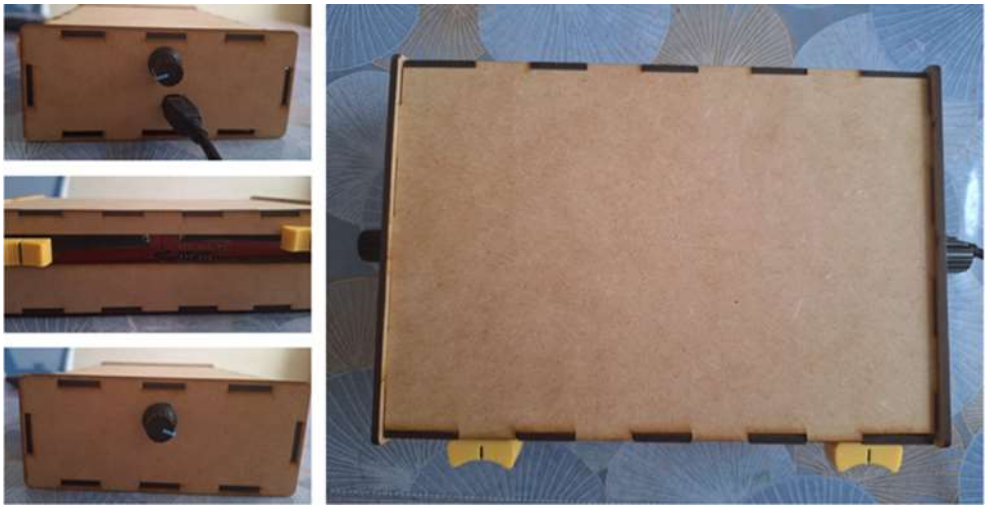


Figura 8. Dispositivo construido.
Elaboración propia.

Posteriormente, una vez terminado el dispositivo se genera un gráfico que permite visualizar el movimiento de las rectas en tiempo real, desplazarlas y posicionarlas en el plano cartesiano, así como ajustar el ángulo y la longitud de cada recta, lo que facilita su

representación espacial en dicho plano, ubicando las coordenadas. Los datos se capturan y se almacenan en las celdas de Excel con los potenciómetros, si bien, el uso de la lógica difusa mediante un sistema Sugeno no solo ha mejorado la visualización y el análisis de las señales analógicas provenientes de los potenciómetros, sino que también ha demostrado ser una solución eficiente para manejar las variaciones de estos componentes.

Partiendo del proceso de resultados, se capturan y almacenan las coordenadas resultantes de un sistema de ecuaciones lineales 2x2, en el que se registran los valores de X y Y, que representan dos rectas en el plano cartesiano, cuyos parámetros se controlan mediante los potenciómetros.

Cada recta responde al modelo algebraico: $y = m_1x + b_1$ y $y = m_2x + b_2$ donde la pendiente (m) y la ordenada al origen (b) varían en tiempo real a partir de señales analógicas procesadas por Arduino y estabilizadas mediante lógica difusa. Con el propósito de visualizarlos en un gráfico y crear una recta mediante la unión de dos puntos, se obtuvieron las coordenadas polares a partir de los valores de voltaje de entrada de los potenciómetros, utilizando la fórmula radianes = (180π) × grados. Seguido de la elaboración de una macro en VBA (Visual Basic for Applications) que, al activarse mediante el botón denominado “Marcar punto” ubicado en la macro de Excel, guarda las coordenadas recibidas en las celdas correspondientes de la hoja de cálculo, como se visualiza en la figura 9.

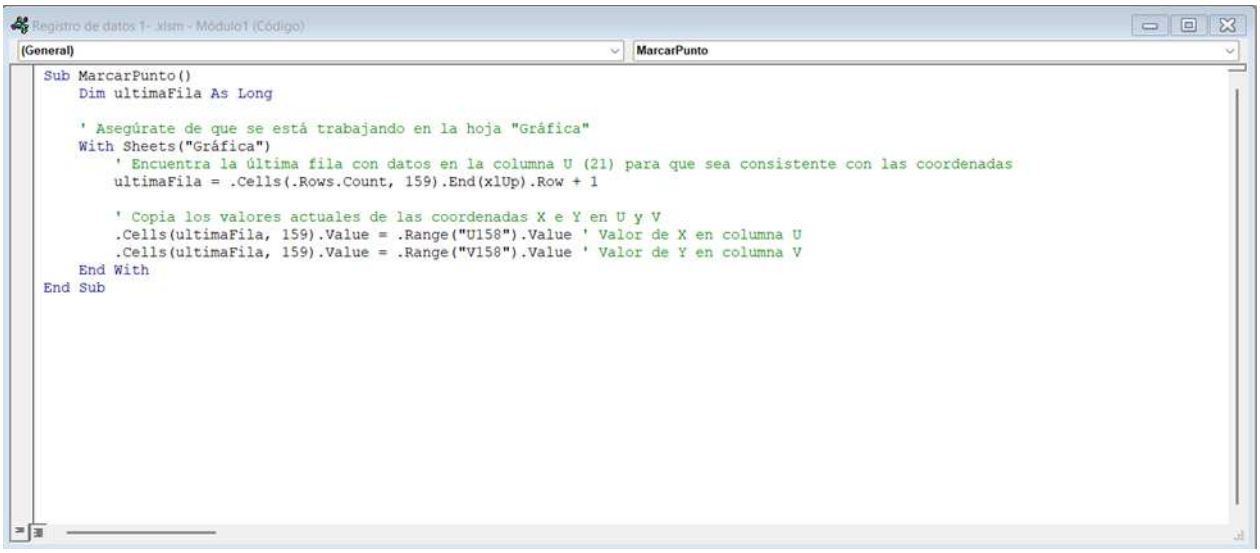


Figura 9. Macro en VBA (Visual Basic for Applications).
Elaboración propia.

Si bien en la figura 10 se observa, en el plano cartesiano (lado izquierdo), la representación de dos rectas construidas a partir de datos de entrada obtenidos al manipular los potenciómetros. Se identifican tres puntos: $P1(29.12,48.97)$, $P2(-86.05,-40.51)$y $P3(-10.37,-53.86)$, provenientes de la adquisición de señales mediante Arduino y su procesamiento en Excel. A partir de estos puntos, se construyen las rectas. La primera recta se obtiene con los puntos $P1$y $P2$; mediante la fórmula de la pendiente $m = \frac{y_2-y_1}{x_2-x_1}$, la cual se calcula $m_1 \approx 0.78$, y sustituyendo uno de los puntos en la ecuación $y = mx + b$, se determina la ordenada al origen $b_1 \approx 26.2$, obteniéndose así la

ecuación $y = 0.78x + 26.2$, La segunda recta se construye a partir de los puntos $P2$y $P3$, resultando en una pendiente $m_2 \approx -0.176$y una ordenada al origen $b_2 \approx -55.6$, lo que da lugar a la ecuación $y = -0.176x - 55.6$.

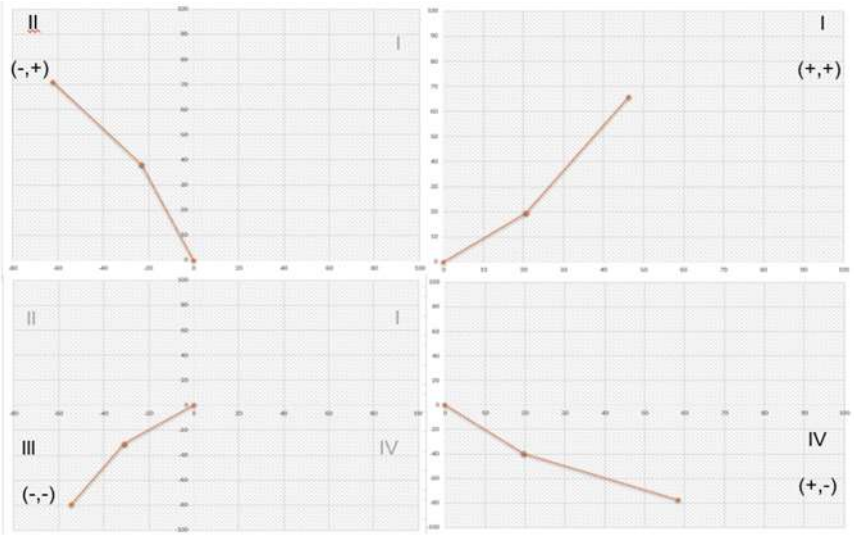


Figura 10. Gráfico del plano cartesiano.
Elaboración propia.

Una vez obtenidas ambas ecuaciones, se reescriben en su forma estándar como $y - 0.78x = 26.2$y $y + 0.176x = -55.6$, lo cual permite identificar los coeficientes de las variables. A partir de esta estructura, el sistema puede expresarse en forma matricial como $AX = B$, donde la matriz A está conformada por los coeficientes $(-0.78,1)$y $(0.176, 1)$, el vector $X = (x, y)^T$representa el punto de intersección de las rectas, y el vector $B = (26.2, -55.6)^T$contiene los términos independientes. La formulación de los datos permite establecer una conexión directa entre la representación gráfica y el modelo algebraico. Al resolver el sistema, ya sea de manera analítica o interpretando la intersección en la gráfica, se obtiene el punto aproximado $(x, y) \approx (-86, -40)$, el cual coincide con el punto $P2$. Este resultado resalta, ya que demuestra que uno de los puntos generados por la interfaz corresponde a la solución del sistema de ecuaciones, lo que, valida la coherencia entre los datos obtenidos, la construcción de las rectas y su intersección.

Los resultados evidencian la viabilidad técnica de la integración Arduino–Excel mediante la validación de la precisión del sistema en tres escenarios clave. En primer lugar, en el caso de un sistema determinado, el ajuste de los potenciómetros a valores como $(x = 2, y = 3)$, por mencionar algunos, permitió que la interfaz gráfica representara la intersección exacta sin variaciones, debido al filtrado implementado mediante lógica difusa. En segundo lugar, en un escenario inconsistente en el que las pendientes se configuraron como rectas paralelas, el sistema gestionó de forma estable la ausencia de un punto de intersección. Finalmente, la prueba de latencia confirmó que la transmisión a través de *Data Streamer* mantuvo la actualización de las gráficas en tiempo real, con un retraso imperceptible inferior a 100 ms, lo cual es crítico para mantener la atención del estudiante durante la interacción física.

4.2 Interpretación de los resultados

En este sentido, el proceso completo que inicia con la generación de datos mediante Arduino como se visualiza en la figura 11 continúa con la construcción de rectas en Excel y termina con la identificación visual del punto de intersección siendo equivalente a la resolución de un sistema de ecuaciones lineales en su forma matricial $AX = B$. Mostrando que la interfaz interactiva desarrollada no solo permite la visualización de relaciones matemáticas, sino también muestra el proceso integrando la experimentación, la representación gráfica y el álgebra lineal.

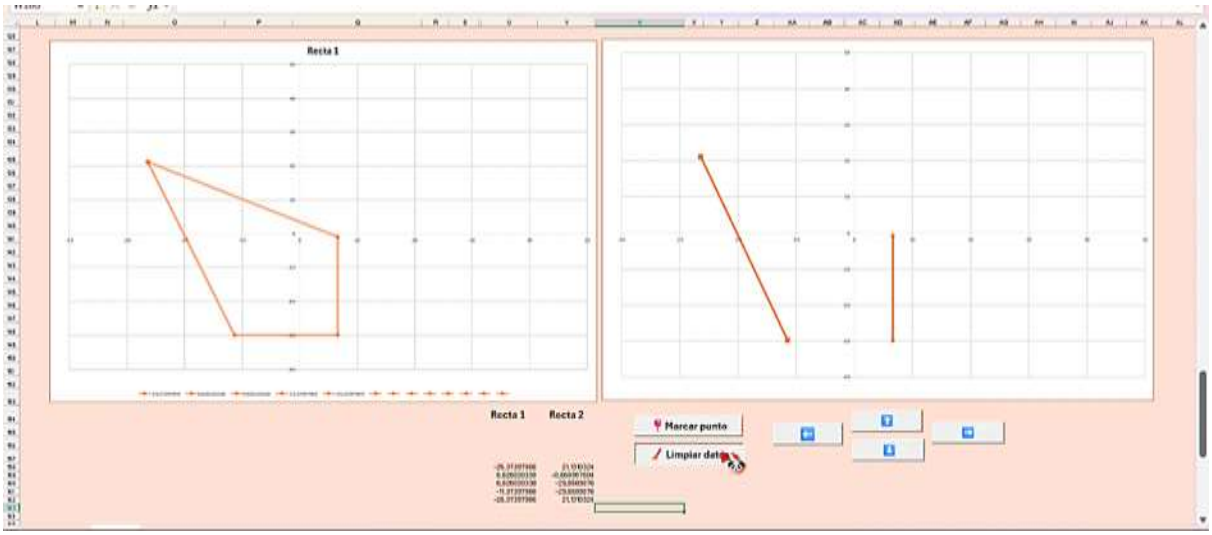


Figura 11. Representación matricial con las coordenadas de X y Y.
Elaboración propia.

En relación con lo anterior, se observó que al manipular los potenciómetros de perilla se controlan los grados de posicionamiento dentro del plano, mientras que los potenciómetros deslizables controlan la distancia y, en función de las coordenadas, se obtuvieron valores inestables que modifican constantemente los datos. Dado que se trata de elementos de hardware de bajo costo, su precisión es limitada. Esto provoca que la interpretación de los datos sea inestable, por lo que las rectas del plano presentan variaciones y dificultan el posicionamiento en un punto exacto.

Por lo tanto, se requirió estabilizar las señales de los potenciómetros mediante el sistema difuso realizado anteriormente para mejorar la visualización de los datos. El sistema de lógica difusa permite manipular información, como en el caso de las señales de potenciómetros. Para modelar la inferencia de los datos de entrada, se ha implementado un sistema Sugeno (Morales Luna, 2002) de orden 0 y tipo 1, utilizando un método de inferencia basado en reglas de tipo condicional, que pueden interpretarse como “si-entonces” para el modelado de sistemas complejos, dando como resultado una salida numérica precisa, en lugar de un sistema difuso, el cual se opera en Matlab. Este sistema de inferencia difusa permite interpretar y gestionar la incertidumbre de los datos, ofreciendo un enfoque preciso y flexible para resolver problemas complejos en el ámbito de la ingeniería y la electrónica. La implementación de la interfaz interactiva basada en la lógica difusa y en elementos electrónicos de bajo costo, como los potenciómetros, placas y demás materiales para su construcción, obtuvo un valor total aproximado de $150.00 MXN. Ha

demostrado ser una solución efectiva y accesible para estabilizar señales analógicas y gestionar la incertidumbre inherente a este tipo de hardware.

Ahora bien, el diseño de un sistema difuso Sugeno de tipo 1 y orden 0 en Excel permitió interpretar y controlar los datos de entrada, lo que mejora la precisión y la confiabilidad de las mediciones. Este enfoque no solo optimiza la representación gráfica en tiempo real en Excel, sino que también permite integrar la lógica difusa con Arduino, lo que facilita el análisis y la visualización de datos sin necesidad de software adicional, como MATLAB, una vez validados los parámetros. La estabilidad alcanzada en las señales y la capacidad de observar en tiempo real el comportamiento de las variables. Además, esta propuesta destaca la importancia de aplicar enfoques innovadores para superar las limitaciones de los componentes económicos y ofrecer una alternativa eficiente y accesible para el desarrollo de sistemas electrónicos confiables. La lógica difusa no solo amplía las posibilidades de interpretación de datos, sino que también permite establecer parámetros precisos mediante reglas bien definidas y ofrecer soluciones adaptativas a problemas complejos.

4.3 Comparación con trabajos previos

La efectividad de esta interfaz como recurso didáctico coincide con lo expuesto por Palencia González & García Llamas (2017) quienes afirman que la representación gráfica en Excel reduce la carga cognitiva en el aprendizaje de funciones. Sin embargo, nuestra propuesta añade un componente táctil (háptico) que, según el enfoque de Ruiz Ledezma et al. (2022), es fundamental en el modelo STEM (*Science, Technology, Engineering and Mathematics*) para cerrar la brecha entre la teoría matemática y la aplicación física.

A diferencia de los métodos tradicionales de enseñanza basados en software estático, la inclusión de lógica difusa permite una estabilización del aprendizaje refiriéndose a estabilizar las rectas para el posicionamiento de los puntos a graficar para la representación del sistema de ecuaciones, similar a la estabilización de señales descrita por Castañeda Barbarán (2020). Mientras que el hardware de bajo costo suele introducir ruido en la entrada de datos que confunde al alumno, al no contar con datos estables, el sistema Sugeno de orden 0 permite que el estudiante se enfoque en la variación matemática y no en los errores del dispositivo. Esto respalda la tesis de Jara Ulloa & Casillas Alcalá (2024) sobre la importancia de integrar recursos digitales robustos y confiables para evitar la frustración en estudiantes de ingeniería. Si bien los resultados coinciden con la propuesta de Ponce Silva (2017) sobre la necesidad de una interfaz que facilite la visualización y enfatice el rol del docente como facilitador, el diseño de la interfaz automatiza parte de esa facilitación al permitir que el estudiante manipule variables físicas y vea el resultado gráfico de inmediato, reduciendo así la brecha de abstracción identificada entre los estudiantes de ingeniería.

En comparación con los trabajos mencionados anteriormente que utilizan GeoGebra o NetLogo, la aportación de este manuscrito no se limita a la visualización digital de conceptos matemáticos, sino que incorpora una interacción física directa. Ya que el estudiante no solo observa la variación de una recta, sino que modifica físicamente los parámetros del sistema por medio de los potenciómetros, observa el desplazamiento de las rectas en tiempo real y relaciona los datos obtenidos para obtener una representación algebraica. Esta diferencia técnica permite conectar la abstracción matemática con una experiencia tangible de interacción, medición y visualización.

Ahora bien, con respecto a los trabajos basados en Arduino, la diferencia arraigada en la forma de abordar la incertidumbre. Diversas propuestas utilizan Arduino para capturar datos y enviarlos a plataformas de visualización; sin embargo, en este manuscrito se integra un sistema de inferencia difusa Sugeno de orden 0 y tipo 1 para estabilizar las señales analógicas generadas por potenciómetros de bajo costo. Lo que permite reducir las variaciones en los datos de entrada y mejorar la certeza de la representación gráfica. En consecuencia, la herramienta no solo captura datos, sino que también los interpreta, los filtra y los convierte en parámetros para construir rectas y representar un sistema de ecuaciones lineales. De igual forma, en comparación con estudios que hacen uso de la lógica difusa en contextos de ingeniería o control de señales, la aportación de este trabajo consiste en usar dicho enfoque en un contexto didáctico de álgebra lineal. Ya que la lógica difusa no se utiliza únicamente como técnica de control, sino también como estabilizador de datos para favorecer la visualización matemática. Así, el sistema Sugeno actúa como un puente entre la señal inestable y la representación algebraica de rectas en el plano cartesiano.

Por tanto, la aportación específica del manuscrito consiste en el diseño y validación técnica de una herramienta didáctica interactiva que integra Arduino, Excel, Data Streamer, macros en VBA y lógica difusa con un sistema Sugeno para representar sistemas de ecuaciones lineales en tiempo real. A diferencia de los trabajos previos que hacen uso de software matemático, simuladores digitales o la simple adquisición de datos, esta propuesta articula hardware de bajo costo, procesamiento difuso de señales y visualización algebraica gráfica en una sola interfaz. Tal integración permite la manipulación física de variables que se transforman en coordenadas, rectas, intersecciones y representaciones matriciales, lo cual es el principal aporte técnico y didáctico del manuscrito.

4.4 Implicaciones didácticas y limitaciones

En conjunto, las herramientas empleadas son accesibles y, además de ser tecnologías avanzadas y modelos de lógica difusa, representan un avance considerable en la enseñanza y las prácticas de la ingeniería. Dicho enfoque mejora la calidad de los datos obtenidos, además de capacitar a los estudiantes para afrontar retos del mundo laboral y cotidiano real con soluciones innovadoras, fomentando el desarrollo de habilidades en áreas como lo son: análisis de datos, robótica y automatización.

No obstante, es importante mencionar que los resultados obtenidos se deben exclusivamente a la validación técnica del sistema. Si bien, la herramienta fue diseñada con fines educativos y se sustenta en principios pedagógicos, en dicha investigación no se realizó una evaluación formal con estudiantes. Por ello, no es posible mostrar mejoras en el aprendizaje, la comprensión conceptual o desarrollo de competencias. Como trabajo futuro, se recomienda realizar estudios experimentales con fines pedagógicos permitan evaluar el impacto didáctico de la herramienta en contextos reales de enseñanza.

5. Conclusiones

El presente trabajo permitió demostrar la viabilidad de integrar Arduino, Microsoft Excel y la lógica difusa de Sugeno en una herramienta interactiva para la representación dinámica de sistemas de ecuaciones lineales 2×2. La propuesta desarrollada permitió capturar datos en tiempo real a través de potenciómetros, procesarlos mediante un sistema de inferencia difusa y representarlos gráficamente en un plano cartesiano, lo que

facilitó la visualización de rectas y de sus puntos de intersección.

Los resultados obtenidos mostraron que la incorporación de lógica difusa permite estabilizar las señales analógicas provenientes de hardware de bajo costo, reduciendo las fluctuaciones con la incertidumbre de los potenciómetros y mejorando la representación gráfica. Asimismo, al comparar los resultados obtenidos en Excel con los verificados en MATLAB, se encontró que coincidían. Confirmando que el sistema funciona de manera estable.

Desde una perspectiva práctica, la propuesta ofrece una alternativa de bajo costo para el desarrollo de recursos tecnológicos aplicados a la enseñanza de las matemáticas y la ingeniería. Además, demuestra que herramientas ampliamente disponibles, como Excel, pueden utilizarse como plataformas de visualización y procesamiento, sin requerir software especializado, una vez validado el modelo difuso.

Si bien el alcance se limitó al diseño, la implementación y la validación técnica del sistema. Por lo tanto, no se evaluó experimentalmente su impacto en el aprendizaje, la comprensión conceptual o el desarrollo de competencias en estudiantes. Como trabajo futuro, se recomienda realizar estudios con grupos de estudiantes que permitan analizar la efectividad pedagógica de la herramienta y comparar sus resultados con los de otras estrategias de enseñanza empleadas en álgebra lineal.

Como líneas de trabajo futuras, se propone realizar estudios experimentales con estudiantes de ingeniería para analizar la efectividad pedagógica de la herramienta en contextos reales de enseñanza. También, se plantea agregar a la interfaz sistemas de ecuaciones lineales 3×3, así como ejercicios de mayor complejidad, con el fin de evaluar la robustez del sistema haciendo uso de distintos tipos y marcas de sensores. Lo cual permitirá fortalecer la validez educativa y la tecnológica de la propuesta.

6. Agradecimientos

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca de manutención para estudios de posgrado.

7. Referencias

[1] Díaz Barriga, A. F., & Hernández Rojas, G. (2002). *Estrategias docentes para un aprendizaje significativo: una interpretación constructivista* (McGraw Hill, Ed.; Tercera). McGraw-Hill. https://es.scribd.com/document/561472490/Estrategias-Docentes-Para-Un-Aprendizaje-Significativo-Una-Interpretacion-Constructivista

[2] Secretaría de Educación Pública. (2016). *Álgebra Lineal.* Secretaría Académica, de Investigación e Innovación. TecNM.

[3] Becerril Vilchis, F., Campero Carmona, A. C., & López Solís, F. (2019). *Programa de estudios álgebra lineal*. UAEMEX.

[4] Piñón Jiménez, A., & Córdova Esparza, D. M. (2023). *Systematic Review: State of Knowledge on Learning Difficulties and Teaching Strategies in Linear Algebra.* International Congress on Education and Technology in Sciences. https://doi.org/DOI:10.19153/cleiej.28.2.11

[5] Tashtoush, M., Wardat, Y., Al-Shannaq, M., AlAli, R., Saleh, S., & AL-Saud, K. (2023). *Conceptual Understanding for Systems of Linear Equations: Difficulties and Challenges.* Information Sciences Letters, 12(12), 2491–2503.

https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18576/isl/121210

[6] Rangel Ruiz, L., Roa Fuentes, S., & García Torres, E. (2026). *La teoría APOE y la Enseñanza del Álgebra Lineal: Comprensión de los Sistemas de Ecuaciones Lineales y su Conjunto de Solución en Estudiantes de Ingeniería.* Innovaciencia, 14(1). https://doi.org/10.15649/2346075X.5861

[7] Wong, Jacqueline., Papageorgiou, E., Klaassen, R., Van der Wal, N., Menschaart, L., & Cabo, A. J. (2022). *Research on mathematical competencies in engineering education: where are we now? Sefi 2022* - 50th Annual Conference of the European Society for Engineering Education, Proceedings, 1815–1828. https://doi.org/10.5821/conference-9788412322262.13100

[8] Jara Ulloa, F. J., & Casillas Alcalá, M. T. (2024). *Efecto del uso e integración de dispositivos móviles y recursos educativos digitales en Matemáticas con estudiantes de Ingeniería.* European Public & Social Innovation Review, 10, 1–15. https://doi.org/https://doi.org/10.31637/epsir-2025-298

[9] Costa, V. A., & Rossignoli, R. (2017). *Enseñanza del algebra lineal en una facultad de ingeniería: Aspectos metodológicos y didácticos.* Revista Educación En Ingeniería, 12(23), 49. https://doi.org/https://doi.org/10.26507/rei.v12n23.734

[10] Gamboa, R. (2007). *"Uso de la tecnología en la enseñanza de las matemáticas."* CORE, 3, 11–44. https://core.ac.uk/outputs/333874981/?utm_source=pdf&utm_medium=banner&utm_campaign=pdf-decoration-v1

[11] Ponce Silva, N. E. (2017). *La enseñanza y aprendizaje del álgebra lineal para estudiantes de la carrera de ingeniería civil de la universidad laica "eloy alfaro" de manabí.* REFCALE: Revista Electrónica Formación y Calidad Educativa. ISSN 1390-9010, 5(3), 29–38. https://refcale.uleam.edu.ec/index.php/refcale/article/view/1537

[12] Salas-Rueda, R. A. (2019). *Modelo TPACK: ¿Medio para innovar el proceso educativo considerando la ciencia de datos y el aprendizaje automático?* Entreciencias: Diálogos En La Sociedad Del Conocimiento, 7(19), 51–66. https://doi.org/10.22201/ENESL.20078064E.2018.19.67511

[13] Zarzar Charur, C. (2015). *Instrumentación didáctica por competencias* (Primera edición). Grupo Editorial Patria. https://books.google.es/books?id=2UTJDgAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false

[14] Navaridas Nalda, F. (2004). *Estrategias didácticas en el aula universitaria. In Universidad de La Rioja.* Universidad de La Rioja. https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=59764&info=resumen&idioma=SPA

[15] Zarzar Charur, C. (2000). *La Didáctica Grupal* (1.a edición). Editorial Progreso, S.A. de C.V. https://books.google.com.mx/books?id=V3T4etphMm4C&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false

[16] Palencia González, F. J., & García Llamas, M. C. (2017). *Análisis y representación gráfica de funciones matemáticas con Excel.* Anales de ASEPUMA, (25).

[18] Ruiz Ledezma, E. R., Acosta-Magallanes, F., & Valero-Cázarez, D. M. S. (2022). *Aproximación Interdisciplinar STEM con Recursos Tecnológicos para el Tratamiento de Conceptos de Física y Matemáticas.* Cultura Científica y Tecnológica, 19(2), E13–E22. https://doi.org/10.20983/CULCYT.2022.2.2E.2

[19] Jimenez, A., & Lahuerta, A. (2022). *Analysis of the relationship between students' proficiency level and their ability to identify figurative language*. Ibérica, (43), 179–204. https://doi.org/10.17398/2340-2784.43.179

[20] Du, C. J., & Sun, D. W. (2008). *Object Classification Methods.* Computer Vision Technology for Food Quality Evaluation, 81–107. https://doi.org/10.1016/B978-012373642-0.50007-7

[21] Morales Luna, G. (2002). *Introducción a la lógica difusa.* Centro de Investigación y de Estudios Avanzados Del IPN (CINVESTAV).

[22] Zadeh, L. A. (1965). *Fuzzy sets.* Information and Control, 8(3), 338–353. https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X

[23] Rasúa López, M. (2003). *Microsoft Excel en la solución de problemas de Algebra Lineal. Pedagogía Universitaria*, 8(3), 26+. https://link.gale.com/apps/doc/A146892136/IFME?u=anon~8d08459a&amp

[24] Aguirre Manríquez, I. V, García Guzmán, M. Á., Razón González, J. P., & Cano Lara, M. (2022). *Basic operation of rotary potentiometer A, B, C and W. Journal of Innovative Engineering*, 6(19), 1–5. https://doi.org/10.35429/JOIE.2022.19.6.1.5

[25] Aspiazu Hidalgo, S. F., Macay García, D. C., Castro Villacreses, V. H., Blacio Medina, S. L., & López Polo, J. R. (2024). *El Acceso a Materiales Educativos Actualizados Sobre Tecnología en el Ámbito de la Educación.* Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 8(5), 1437–1459. https://doi.org/10.37811/CL_RCM.V8I5.13610

[26] Piaget, Jean. (1977). *La explicación en las ciencias.* 22. https://es.scribd.com/document/258182732/Piaget-Jean-Et-Al-1977-La-Explicacion-en-Las-Ciencias

[27] Schunk, D. H. (2012). *Teorías del aprendizaje: Una perspectiva educativa* (6.a edición). Pearson Educación de México. https://hdl.handle.net/20.500.14330/PER01000366815

[28] Hernández Sampieri, R., Fernádez Collado, C., & Baptista Lucio, M. D. P. (2014). *Metodología de la investigación. In Metodología de la investigación* (6th ed.). McGraw Hill España. https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=775008&info=resumen&idioma=SPA

[29] Vidal Silva, C., Lineros, M. I., Uribe, G. E., & Olmos, C. J. (2019). *Electrónica para Todos con el Uso de Arduino: Experiencias Positivas en la Implementación de Soluciones Hardware-Software*. Information Technologic, 30(6), 377–386. https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000600377

[30] MathWorks. (n.d.). *Analyze fuzzy system using Fuzzy Logic Designer*. MathWorks Documentation. Retrieved April 9, 2026, from https://la.mathworks.com/help/fuzzy/analyze-fuzzy-system-using-fuzzy-logic-designer.html

[31] Castañeda Barbarán, M. del C. (2020). *Implementación del Algoritmo de Control Lógica Difusa en robot detector de obstáculo utilizando la robótica con tecnología ARDUINO*. Emprendimiento Científico Tecnológico, 1(2020). https://orcid.org/0000-0002-7130-9131