

Desafíos de la producción de frijol ante el incremento de la temperatura

VOLUMEN 20
NÚMERO 1 JUL-DIC
2025

Protección de derechos de
autor en imágenes digitales

Nuevos registros de peces
crípticos para el arrecife
Lobos, en Veracruz

INFORMACIÓN PARA EL MUNDO DESDE TU UNIVERSIDAD



www.revistaciencia.uat.edu.mx

e-mail: cienciauat@uat.edu.mx

Directorio

MVZ MC Dámaso Leonardo Anaya Alvarado

Rector
Universidad Autónoma de
Tamaulipas

Dra. María Concepción Placencia Valadez

Secretaria General

Dr. Fernando Leal Ríos

Secretario de Investigación y Posgrado

Dra. Rosa Issel Acosta González

Secretaria Académica

Dra. Dora María Lladó Lárraga

Secretaria Técnica del Consejo de
Publicaciones
Dirección de Investigación

CienciaUAT. Año: 2025, Volumen: 20, Número: 1, julio-diciembre. Publicación multidisciplinaria semestral editada por la Universidad Autónoma de Tamaulipas, a través del Consejo de publicaciones de la Secretaría de Investigación y Posgrado, Matamoros S/N, Zona Centro, Ciudad Victoria, Tamaulipas, México, C.P. 87000; Tels. (834) 3181800 y 3181700, ext. 2962. Página web: <https://revista-cienciauat.edu.mx> y correo electrónico: cienciauat@uat.edu.mx. Editor responsable: Dr. José Alberto Ramírez de León. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2016-053110082800-203, ISSN electrónico: 2007-7858; ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número: Dr. José Alberto Ramírez de León. Fecha de la última modificación: 19 de noviembre de 2025.

Se permite la reproducción del contenido para actividades no comerciales dando los créditos correspondientes a la revista CienciaUAT. Los artículos e investigaciones son responsabilidad de los autores.

Prólogo

Estimados lectores:

Este volumen de CienciaUAT presenta una compilación de trabajos de temas relevantes para el desarrollo regional y global, con contribuciones innovadoras que promueven la sostenibilidad, la salud y el avance científico, invitando a investigadores y lectores a profundizar en soluciones prácticas para desafíos ambientales, sanitarios y educativos en entornos latinoamericanos.

En el área de Biología y Química se incluye un estudio sobre estrategias de manejo y conservación de insectos comestibles (hormigas escamoleras y gusanos de maguey) en el Altiplano Potosino-Zacatecano. Respecto a la biodiversidad marina, se presentan nuevos registros de peces crípticos en el arrecife Lobos, Veracruz, México.

Medicina y Ciencias de la Salud aborda avances en la estrategia de telerrehabilitación en fisioterapia postaccidente cerebrovascular, mostrando efectos similares a terapias convencionales en recuperación motora y actividades diarias. También se describe el efecto cicatrizante de proteínas de mango (*Mangifera indica* var. manila) en fibroblastos humanos, con potencial para promover migración celular sin citotoxicidad.

En el área de Ciencias Sociales se examina el bienestar humano en contextos educativos, al analizar el bienestar psicológico y la resiliencia en docentes de educación básica en el país de Chile.

La sección de Biotecnología y Ciencias Agropecuarias es la más extensa, con seis contribuciones sobre innovación agrícola y alimentaria. En el área agrícola se analiza la mortalidad de ninfas de "*Bactericera cockerelli*" potenciada por nanopartículas de grafito en insecticidas; los desafíos que representa el incremento térmico climático en la producción de frijol y el control de virus/plagas en México; complementado con una investigación sobre las ventajas de la fertilización foliar con boro y magnesio para mitigar estrés por altas temperaturas en frijol. En el campo de alimentos, se estudia el uso de microencapsulación de jugo de granada y extracto de jamaica para propiedades antioxidantes y antimicrobianas; la optimización de la hidrólisis de colágeno bovino para mejorar propiedades tecnofuncionales y antioxidantes de alimentos; y el desarrollo de modelos QSAR con redes neuronales para estimar inhibidores de α -glucosidasa de fenólicos presentes en matrices alimentarias.

El área de Ingenierías cierra con un enfoque en seguridad digital: un algoritmo robusto de marcado de agua libre de distorsiones para autenticación de imágenes, usando redes neuronales siamesas.

Esperamos que la lectura de este interesante volumen sume a su conocimiento.

Verdad, Belleza, Probidad



MVZ MC Dámaso Leonardo
Anaya Alvarado
Rector
Universidad Autónoma de Tamaulipas

EDITOR RESPONSABLE

Dr. José Alberto Ramírez de León (SNI III)
Universidad Autónoma de Tamaulipas, México
 E-mail: ramirez@uat.edu.mx

EDITORES DE INGLÉS

Dr. Alberto Mora Vázquez (SNI I)
Universidad Autónoma de Tamaulipas, México

Dra. Nelly Paulina Trejo Guzmán (SNI I)
Universidad Autónoma de Tamaulipas, México

FÍSICA, MATEMÁTICAS
Y CIENCIAS DE LA TIERRA

Dra. Evelia Reséndiz Balderas (SNI I)
Universidad Autónoma de Tamaulipas, México
 Dr. Héctor Vázquez Leal (SNI III)
Universidad Veracruzana, México
 Dr. José Alberto Batista Rodríguez (SNI I)
Universidad Autónoma de Coahuila, México



BIOLOGÍA Y QUÍMICA

Dr. Arturo Mora Olivo (SNI II)
Universidad Autónoma de Tamaulipas, México
 Dr. Dante Arturo Rodríguez Trejo (SNI II)
Universidad Autónoma Chapingo, México
 Dra. Elisa Serviere Zaragoza (SNI III)
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C., México
 Dr. Enrique Richard
Universidad San Gregorio de Portoviejo, Calceta, Manabí, Ecuador
 Dr. Enrique Ruíz Cancino (SNI I)
Universidad Autónoma de Tamaulipas, México
 Dr. Gildardo Rivera Sánchez (SNI III)
Instituto Politécnico Nacional, México
 Dr. Javier Jiménez Pérez (SNI I)
Universidad Autónoma de Nuevo León, México
 Dra. Juana María Coronado Blanco (SNI III)
Universidad Autónoma de Tamaulipas, México
 Dra. Lía Celina Méndez Rodríguez (SNI II)
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C., México
 Dr. Manuel León Camacho
Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España
 Dr. Víctor López Martínez (SNI II)
Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México
 Dra. María Guadalupe Aguilar Uscanga (SNI III)
Instituto Tecnológico de Veracruz, México

MEDICINA Y CIENCIAS DE LA
SALUD

Dr. Aldo Fidel Izaguirre Hernández (SNI I)
Universidad Autónoma de Tamaulipas, México
 Dr. Amaury de Jesús Pozos Guillén (SNI III)
Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México
 Dr. Carlos Javier Pineda Villaseñor (SNI III)
Instituto Nacional de Rehabilitación, México
 Dr. Francisco Vázquez Nava (SNI II)
Universidad Autónoma de Tamaulipas, México
 Dr. Guillermo Manuel Ceballos Reyes (SNI III)
Instituto Politécnico Nacional, México
 Dr. Juan Miguel Jiménez Andrade (SNI III)
Universidad Autónoma de Tamaulipas, México
 Dra. Montserrat Bacardi Gascón (SNI III)
Universidad Autónoma de Baja California, México
 Dra. Octelina Castillo Ruiz (SNI I)
Universidad Autónoma de Tamaulipas, México
 Dr. Sandro Fernandes Da Silva
Universidade Federal de Lavras, Brasil
 Dr. Virgilio Bocanegra García (SNI III)
Instituto Politécnico Nacional, México

HUMANIDADES Y
CIENCIAS DE LA CONDUCTA

Dr. Fernando Flores Camacho (SNI II)
Universidad Nacional Autónoma de México, México
 Dr. José Luis Ybarra Sagarduy (SNI II)
Universidad Autónoma de Tamaulipas, México
 Dra. Marcela Alejandra Tiburcio Sainz (SNI II)
Instituto Nacional de Psiquiatría Ramón de la Fuente Muñiz, México
 Dra. María Guadalupe Moreno Bayardo (SNI II)
Universidad de Guadalajara, México
 Dra. María Elena Rivera Heredia (SNI III)
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México
 Dra. María Elena Teresa Medina-Mora Icaza (SNI III)
Instituto Nacional de Psiquiatría Ramón de la Fuente Muñiz, México
 Dr. Octavio Herrera Pérez (SNI I)
Universidad Autónoma de Tamaulipas, México
 Dr. Rubén Salvador Roux Gutiérrez (SNI I)
Universidad Autónoma de Coahuila, México



CIENCIAS SOCIALES

Dra. Aidé Aracely Maldonado Macías (SNI II)
Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México
 Dr. Antonio Hidalgo Nuchera
Universidad Politécnica de Madrid, España
 Dr. Arturo Zárate Ruiz (SNI I)
El Colegio de la Frontera Norte, México
 Dra. Cirila Quintero Ramírez (SNI III)
Colegio de la Frontera Norte de Tamaulipas, México
 Dr. Ernesto Aguayo Téllez (SNI II)
Universidad Autónoma de Nuevo León, México
 Dr. Francisco García Fernández (SNI III)
Universidad Autónoma de Tamaulipas, México
 Dra. Guadalupe Correa Cabrera
George Mason University, Estados Unidos
 Dra. Joana Cecilia Chapa Cantú (SNI II)
Universidad Autónoma de Nuevo León, México
 Dr. José Antonio Aparisi Caudeli
Universidad de Valencia, España
 Dr. Juan Alfredo Tuesta Panduro
Universidad Privada del Norte, Perú
 Dra. Julieta María Ana Quilodrán Salgado (SNI II)
El Colegio de México, México
 Dra. Karla Lorena Andrade Rubio (SNI III)
Universidad Autónoma de Tamaulipas, México
 Dra. Lucila Hinojosa Córdova (SNI II)
Universidad Autónoma de Nuevo León, México
 Dra. María Isabel de la Garza Ramos (SNI I)
Universidad Autónoma de Tamaulipas, México
 Dr. Miguel Díaz Barriga
University of Texas Rio Grande Valley, Estados Unidos
 Dra. Mónica Lorena Sánchez Limón (SNI II)
Universidad Autónoma de Tamaulipas, México
 Dra. Mónica Regina De Arteché
Universidad de San Andrés, Argentina
 Dr. Oscar Misael Hernández Hernández (SNI II)
Colegio de la Frontera Norte de Tamaulipas, México
 Dr. Rodolfo Casillas Ramírez
Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales, México
 Dr. Simón Pedro Izcara Palacios (SNI III)
Universidad Autónoma de Tamaulipas, México
 Dra. Karla Villarreal Sotelo (SNI II)
Universidad Autónoma de Tamaulipas, México

BIOTECNOLOGÍA Y
CIENCIAS AGROPECUARIAS

Dr. Alejandro Espinosa Calderón (SNI III)
Tecnológico Nacional de México, México
 Dra. Ana Belén Moldes Mendiña
Universidad de Vigo, España
 Dr. Carlos Alberto Gómez Aldapa (SNI II)
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México
 Dra. Elizabeth Carvajal Millán (SNI III)
Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo AC, México
 Dr. Enrique Márquez Ríos (SNI III)
Universidad de Sonora, México
 Dra. Eugenia Guadalupe Cienfuegos Rivas (SNI I)
Universidad Autónoma de Tamaulipas, México
 Dr. Francisco Guevara Hernández (SNI III)
Universidad Autónoma de Chiapas, México
 Dr. Francisco Infante Martínez (SNI II)
El Colegio de la Frontera Sur, México
 Dr. Gonzalo Velazquez de la Cruz (SNI III)
Instituto Politécnico Nacional, México
 Dr. Iván Moreno Andrade (SNI II)
Universidad Nacional Autónoma de México, México
 Dr. Jaime Salinas Chavira (SNI II)
Universidad Autónoma de Tamaulipas, México
 Dr. Jesús Genaro Sánchez Martínez (SNI I)
Universidad Autónoma de Tamaulipas, México
 Dr. José Alberto Gallegos Infante (SNI III)
Instituto Tecnológico de Durango, México
 Dr. José Manuel Cruz Freire
Universidad de Vigo, España
 Dr. Juan Arturo Ragazzo Sánchez (SNI III)
Instituto Tecnológico de Tepic, México
 Dr. Juan Carlos Martínez González
Universidad Autónoma de Tamaulipas, México
 Dr. Juan L. Silva
Mississippi State University, Estados Unidos
 Dr. Julio Martínez Burnes (SNI I)
Universidad Autónoma de Tamaulipas, México
 Dr. Luis Ángel Rodríguez del Bosque (SNI III)
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias, México
 Dr. Manuel Vázquez Vázquez
Universidad de Santiago de Compostela, España
 Dra. María Jesús Alcalde Aldea
Universidad de Sevilla, España
 Dra. Montserrat Calderón Santoyo (SNI III)
Instituto Tecnológico de Tepic, México
 Dr. Netzahualcoyotl Mayek Pérez (SNI III)
Universidad Autónoma de Tamaulipas, México
 Dra. Rocío Margarita Uresti Marín (SNI I)
Universidad Autónoma de Tamaulipas, México
 Dr. Roberto Pérez Castañeda (SNI II)
Universidad Autónoma de Tamaulipas, México
 Dra. Rosa María Oliart Ros (SNI III)
Instituto Tecnológico de Veracruz, México
 Ph. D. Rubén Francisco González Laredo (SNI III)
Tecnológico Nacional de México, México



INGENIERÍAS

Dr. Eduardo Morales Sánchez (SNI II)
Instituto Politécnico Nacional, México
 Dr. Daniel Alberto May Arriola (SNI III)
Centro de Investigaciones en Óptica, México
 Dr. Marco Antonio Panduro Mendoza (SNI III)
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, México
 Dr. Ramón Ventura Roque Hernández (SNI II)
Universidad Autónoma de Tamaulipas, México
 Dr. Rodolfo Abraham Pazos Rangel (SNI II)
Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, México
 Dr. Rumen Ivanov Tsonchev (SNI II)
Universidad Autónoma de Zacatecas, México

BIOLOGÍA Y QUÍMICA

- 06** Estrategias de manejo y conservación de insectos comestibles en el Altiplano Potosino-Zacatecano: perspectiva de actores clave
Edible insect management and conservation strategies in the Potosino-Zacatecano Highland: perspectives from key stakeholders
Humberto Romero-Jiménez
Luis Antonio Tarango-Arámbula
Jorge Cadena-Íñiguez
Genaro Olmos-Oropeza
- 25** Nuevos registros de peces crípticos para el arrecife Lobos, Veracruz, México
New cryptic fish records for Lobos reef, Veracruz, Mexico
Vicencio de la Cruz-Francisco
Vanessa Miranda Osuna-Cisneros
Seth Donovan Flores-Serrano
Jimmy Argüelles-Jiménez

MEDICINA Y CIENCIAS DE LA SALUD

- 38** Evidencia sobre los efectos de la telerrehabilitación en fisioterapia en accidente cerebrovascular
Evidence on the effects of telerehabilitation in physiotherapy with stroke
Juan Bernardo Cifuentes-Marín
Cecilia Nicole Sabelle-Garcés
- 51** Efecto en la cicatrización de heridas inducido por proteínas de *Mangifera indica* var. manila en fibroblastos humanos
Wound healing effect induced by *Mangifera indica* var. manila proteins in human fibroblast
Gloria Barrera-Morales
Alma Vázquez-Luna
Leticia Nicolás-Toledo
Yessica Eduviges Zamudio-Cuevas

CIENCIAS SOCIALES

- 66** Bienestar psicológico y resiliencia en el profesorado de educación básica: correlación con la edad y diferencias según sexo y dependencia educacional en Chile
Psychological well-being and resilience in elementary school teachers: correlation with age and differences according to sex and educational dependency in Chile
Valentina Belén Concha-Herrera
Fabiola Sáez-Delgado
Oscar Ulises Reynoso-González
Javier Mella-Norambuena

BIOTECNOLOGÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

- 79** Mortalidad de ninfas de *Bactericera cockerelli* por ingredientes activos químicos potencializados con nanopartículas de grafito
Mortality of *Bactericera Cockerelli* nymphs by active chemical ingredients enhanced with graphite nanoparticles
Alberto Roque-Enriquez
Rocío de Jesús Díaz-Aguilar
Yisa María Ochoa-Fuentes
Ernesto Cerna-Chávez

CienciaUAT

- 88** Microencapsulación de jugo de granada y extracto de jamaica: caracterización fisicoquímica, antioxidante y antimicrobiana

Microencapsulation of pomegranate juice and hibiscus extract: physicochemical, antioxidant, and antimicrobial characterization

Brenda Esmeralda Jiménez-Villeda
Edna Zaranné Martínez-Ramírez
Marithza Guadalupe Ramírez-Gerardo
Erik Gómez-Hernández

- 104** Optimización del proceso de hidrólisis del colágeno bovino y evaluación de sus propiedades tecnofuncionales y antioxidantes

Optimization of the bovine collagen hydrolysis process and evaluation of its techno-functional and antioxidant properties

Raúl Reyes-Bautista
Erik Gustavo Tovar-Pérez
Gustavo Hernández-Mendoza
Luis Alberto Reyes-Nava
Jorge Enrique Pliego-Sandoval

- 123** Incremento de temperatura: desafío emergente para la producción de frijol y el control de sus virus y plagas en México

Temperature increase: an emerging challenge for common bean production and the control of its viruses and pests in Mexico

José Luis Anaya-López
Elizabeth Chiquito-Almanza
Jorge Alberto Acosta-Gallegos
Oscar Hugo Tosquy-Valle

- 144** Fertilización foliar del frijol con boro y magnesio contra el estrés por altas temperaturas naturales

Foliar fertilization of beans with boron and magnesium to prevent high temperature stress

Alejandro Antonio Prado-García
Gabriel Iturriaga de-la-Fuente
César Leobardo Aguirre-Mancilla
Jorge Alberto Acosta-Gallegos

- 163** Desarrollo de modelos QSAR por redes neuronales para la estimación de potenciales inhibidores de α -glucosidasa de fenólicos encontrados en matrices alimentarias

Development of QSAR models using neural networks for the estimation of potential α -glucosidase inhibitors from phenolics found in food matrices

Jesús Jaime Rochín-Medina
Hilda Karina Ramírez-Medina
Luis Enrique Barreto-Salazar
Ángel Ismael Carrillo-Mendivil

INGENIERÍAS

- 183** Algoritmo de marcado de agua robusto: autenticación de imágenes mediante redes neuronales siamesas y características híbridas espacio-frecuencia

Robust zero-watermarking algorithm for image authentication using hybrid spatial-frequency features and siamese neural networks

Rodrigo Eduardo Arevalo-Ancona
Eduardo Frago-Navarro
Manuel Cedillo-Hernández



Escamoles



Recolectores de insectos

Imágenes de Luis Antonio Tarango Arámbula

Estrategias de manejo y conservación de insectos comestibles en el Altiplano Potosino-Zacatecano: perspectiva de actores clave

Edible insect management and conservation strategies in the Potosino-Zacatecano Highland: perspectives from key stakeholders

Humberto Romero-Jiménez, Luis Antonio Tarango-Arámbula*, Jorge Cadena-Íñiguez, Genaro Olmos-Dropeza

RESUMEN

En el Altiplano Potosino-Zacatecano, los insectos comestibles, como la hormiga escamolera, el gusano rojo y el gusano blanco del maguey, se extraen de manera continua y de forma no sostenible, desde hace 30 años pese a su importancia económica. El objetivo del presente estudio fue conocer las limitantes que amenazan la sostenibilidad de la actividad, y las estrategias de manejo y conservación que los recolectores proponen para las tres especies de insectos. Se obtuvo un diagnóstico general de esta actividad mediante entrevistas individuales a recolectores de la zona y se organizó un foro regional participativo en la actividad-recolección de insectos comestibles desde la perspectiva de actores clave. Se realizó un análisis de componentes principales y una agrupación jerárquica de las limitantes que amenazan la sostenibilidad de la recolección de las tres especies de insectos comestibles en la región, así como las estrategias necesarias para atenderlas. Entre las limitantes más relevantes destacaron el manejo inadecuado de nidos, la extracción clandestina, compradores diversos sin compromisos, ausencia de normativas y de regulación legal, y destrucción del maguey y nopal. Entre las estrategias prioritarias, destacaron las relacionadas con la gobernanza, como la normatividad legal, manejo estratégico de ganado y comités de vigilancia, con poca asociación con tecnología, certificación o educación ambiental, y aunque buscan un marco legal, no consideran las acciones que se asocian con las variables de sostenibilidad, las cuales no fueron altamente priorizadas por ningún grupo. Las actividades de reforestación, la gestión de centros de acopio y el establecimiento de cercos de exclusión de ganado no muestran una fuerte conexión con capacitaciones o certificaciones técnicas. Por lo que se requiere desarrollar programas de intervención, destinados a implementar las acciones prioritarias para garantizar la continuidad de esta actividad mediante mecanismos de regulación y control efectivos, y promover prácticas de manejo sostenible.

PALABRAS CLAVE: desarrollo rural, hormiga escamolera, gusano rojo, gusano blanco.

ABSTRACT

In the Potosino-Zacatecano Highlands, edible insects such as the escamolera ant, red maguey worm, and white maguey worm have been continuously harvested for the past 30 years. Although they hold significant economic value, their exploitation is unsustainable. The objective of this study was to identify the limitations threatening the sustainability of this activity and to explore management and conservation strategies proposed by the collectors for the three insect species. A general diagnosis was conducted through individual interviews to collectors, and a regional participatory forum was organized, focusing on the edible insect collection-activity from the perspective of key stakeholders. A principal component analysis and hierarchical clustering were carried out to classify the main limitations affecting the sustainable harvesting of these insects in the region as well as the strategies considered necessary to address them. The most significant limitations included inadequate nest management, illegal extraction, the presence of diverse and uncommitted buyers, lack of regulations and legal frameworks, and destruction of agave and prickly pear plants. Priority strategies were primarily associated with governance, including legal frameworks, livestock management, and the establishment of surveillance committees, as well as the adoption of technologies and the implementation of technical certification schemes. The production-related measures such as reforestation, the management of collection centers, and the installation of livestock exclusion fences were also emphasized. In contrast, conservation, social oversight, and monitoring activities linked to sustainable production practices were not identified as top priorities, despite being recognized as significant limiting factors. It is necessary to develop intervention programs involving key stakeholders, aimed at implementing actions identified as priorities to ensure the continuity of this activity through effective regulatory and control mechanisms, and to promote sustainable management practices.

KEYWORDS: rural development, escamolera ant, red worm, white worm.

*Correspondencia: ltarango@colpos.mx/ Fecha de recepción: 15 de noviembre de 2024/ Fecha de aceptación: 13 de mayo de 2025/ Fecha de publicación: 17 de junio de 2025.

Colegio de Postgraduados, Campus San Luis Potosí, Iturbide núm. 73, Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí, México, C. P. 78600.

INTRODUCCIÓN

En el Altiplano Potosino-Zacatecano existen recursos naturales con gran valor ecológico y socioeconómico, esto último, por la derrama económica que deja su aprovechamiento (Pedroza y col., 2014). Sin embargo, la explotación comercial se realiza de manera no sostenible, lo que es particularmente preocupante para la hormiga escamolera (*Liometopum apiculatum* M.) de la que se aprovechan las larvas, el gusano rojo de maguey (*Comadia redtenbacheri* H.) y el gusano blanco de maguey (*Aegiale hesperiaris* W.) (De-Luna y col., 2013), insectos comestibles que se extraen de manera continua desde hace 30 años (Briones y col., 2022).

La hormiga escamolera posee una capacidad de adaptación a diversos ambientes. Su dieta omnívora y vulnerabilidad biológica baja, la hacen resistente ecológicamente (Berumen y col., 2021). Sus colonias desarrollan hasta 5 caminos de forrajeo, cuyas distancias varían dependiendo del sustrato de interés, y anidan preferentemente en las raíces del maguey mezcalero (*Agave salmiana*) y diferentes variedades de *Yucca* spp (Rafael y col., 2017), también suelen anidar debajo de nopales, mezquites, alicoches e incluso en suelo desnudo (Romero y col., 2024b). Además de su importancia económica y ecológica, destaca por su valor nutricional, ya que sus larvas, denominadas escamoles, contienen proteínas, lípidos, vitaminas y minerales, en concentraciones que dependen del tipo de vegetación (Cruz y col., 2018). Estas se recolectan a partir de la segunda quincena del mes de febrero, y su aprovechamiento, cuando se realiza de manera apropiada, se puede extender hasta el mes de junio. Sin embargo, debido al mal manejo de sus nidos, su aprovechamiento usualmente finaliza en mayo (Briones y col., 2022).

El gusano rojo está asociado al maguey mezcalero, el cual utiliza para completar su ciclo larvario, alimentándose de pencas y raíces, lo que generalmente conduce a la destrucción de la planta o a su desecación si no se extrae (García y col., 2023a). Su recolección, que ocurre en el periodo de agosto a octubre, du-

rante el periodo de lluvias, se realiza en magueyes con pencas amarillentas o rojizas y turgencia reducida (Briones y col., 2022). Esta función biológica natural del maguey, lo hace estratégico y esencial en la existencia de sistemas productivos tradicionales, que promueven la agrobiodiversidad y fortalecen la economía rural mediante el aprovechamiento de insectos comestibles alojados en su interior (Vega y col., 2023), pero a la vez, se enfrenta a un gran reto para su conservación a largo plazo, porque, adicionalmente, es explotado para sustentar la producción de mezcal y pulque, lo que obliga a desarrollar estrategias de conservación, diversificación y valorización del recurso (Figueredo y col., 2024).

El gusano blanco es recolectado sin mayor planeación (al igual que los escamoles y el gusano rojo) para su venta a compradores en los diferentes estados de la República Mexicana. Dicho recurso es nutricionalmente importante para los habitantes rurales (Ramos y Pino, 2001) e incrementa el ingreso económico a través de su aprovechamiento (Esparza y col., 2008). Sus larvas colonizan las pencas de los magueyes pulqueros o mezcaleros. La temporada de recolecta del gusano blanco abarca el periodo de mayo a agosto, pero cada vez es más difícil de encontrar sus larvas en las pencas de los magueyes que hospeda comúnmente, aquellos de entre 5 y 7 años, de pencas ricas en nutrientes (Ramos y col., 2006; Briones y col., 2022). Una vez que el insecto se desarrolla, la penca adquiere una marca de color café oscuro tostado. En la recolecta del gusano blanco, se utiliza un machete para cortar las pencas que presentan síntomas de presencia del gusano. Aunque no todas las pencas con síntomas tienen larvas (Miranda-Román y col., 2011), y cuando las tienen, éstas regularmente hospedan una o dos larvas, que son extraídas de los orificios del maguey con el apoyo de una espina de su penca (Viesca y col., 2012). Las larvas presentan una longitud de aproximadamente 5 cm y un color blanco opaco; su cabeza es de color café claro y pequeña (Miranda-Román y col., 2011).

Los escamoles, el gusano rojo y el gusano blanco, presentan un valor nutricional alto y la aceptación del consumidor por su exquisitez, lo que les confiere potencial agroindustrial, aunque limitado por su disponibilidad estacional (Ramos-Rostro y col., 2016). La cantidad de insectos que se recolecta ha disminuido a través del tiempo, debido a la sobreexplotación de las plantas de maguey, al sobrepastoreo y la afectación por depredadores que interfieren con el ciclo de vida de estos insectos (González y col., 2020).

El objetivo del presente estudio fue conocer los factores que limitan el aprovechamiento sostenible de los insectos comestibles, hormiga escamolera, gusano rojo y gusano blanco; así como las estrategias para su manejo y conservación; además de, determinar la priorización de acciones que permitan garantizar la continuidad de la actividad de recolecta.

MATERIALES Y MÉTODOS

Comunidades rurales

Las comunidades rurales incluidas en el estudio se ubican en los estados de Zacatecas y San Luis Potosí, México. En una región caracterizada por condiciones semiáridas y un fuerte vínculo con actividades agropecuarias tradicionales, en donde el uso de suelo está dominado por la agricultura de temporal y la ganadería extensiva, de acuerdo a la Coordinación Estatal de Planeación (COEPLA, 2022). La vegetación predominante es el matorral xerófilo, combinado con pastizales y, en algunas áreas elevadas, la presencia de bosques de encino y pino, de acuerdo al Instituto Nacional para la Federalismo y el Desarrollo Municipal (INAFED, 2020). Este arreglo ambiental influye directamente en las estrategias de aprovechamiento de los recursos naturales, incluyendo la recolección de insectos comestibles, que representa una actividad complementaria para diversas familias del Altiplano Potosino-Zacatecano (Figueroa y col., 2018). La variabilidad en el acceso a servicios y mercados relacionados al aprovechamiento agrícola y ganadero influye en las estrategias de subsistencia y la conservación de los ecosistemas, por lo que la tipifi-

cación de productores es clave para diseñar políticas y programas adecuados (Mendoza y col., 2019).

Primera fase

Durante febrero-marzo de 2024, se llevó a cabo el estudio, desarrollado con un enfoque cualitativo bajo un modelo de intervención social (Guzmán y col., 2018). Se aplicaron entrevistas individuales a actores clave de insectos comestibles del Altiplano Potosino-Zacatecano, para obtener un diagnóstico general de la actividad-recolecta de insectos comestibles (Tabla 1). Los participantes fueron seleccionados mediante un muestreo intencional, en el que se priorizó la experiencia de los recolectores en la actividad, y su influencia en las prácticas comunitarias, así como su involucramiento en la comercialización. En este proceso de selección se obtuvo el apoyo de la empresa Innovación en Desarrollo Forestal y Servicios Técnicos S. A. de C. V, la cual tiene un amplio conocimiento de la zona de estudio y de los recolectores. La invitación se llevó a cabo a través de contacto telefónico y personal, estableciendo previamente la disponibilidad de los actores clave para las entrevistas. No todos los invitados aceptaron participar, pero se buscó la representatividad de la muestra. Los entrevistados aportaron información sobre una o más especies del escamol, gusano rojo y gusano blanco, dependiendo de su actividad dentro de la recolección.

Briones y col. (2022) reportaron la existencia de 593 recolectores en 18 localidades del municipio de Pinos, Zacatecas. En este estudio se incluyeron recolectores de 7 de esas localidades, en donde existen 256 recolectores, lo que representa un 43.2 %. Se invitaron a 42 actores clave de 12 localidades de Zacatecas y San Luis Potosí, que tuvieran entre 5 años y 10 años de experiencia en la recolección, de los cuales aceptaron participar 31. Se aplicaron 74 encuestas directamente en sus domicilios: 31 para escamol, 22 gusano blanco y 21 para gusano rojo (Tabla 1). Se utilizó una entrevista semiestructurada con preguntas cerradas, de opción múltiple, con la

■ Tabla 1. Coordenadas centrales de las comunidades de los actores clave entrevistados, relacionados con la recolecta de insectos comestibles en el Altiplano Potosino-Zacatecano.

Table 1. Central coordinates of the communities of the key stakeholders interviewed, related to the collection of edible insects in the Potosino-Zacatecano Highland.

Número de entrevistas	Insectos comestibles			Localidad	Estado	Coordenadas geográficas	
	Gusano rojo	Gusano blanco	Escamol			Latitud, N	Longitud, W
4	-	2	2	La Purísima del Salto	Zacatecas	22°27'25.2"	101°28'43.9"
13	4	3	6	El Tecomate	Zacatecas	22°32'03.0"	101°36'43.8"
4	2	1	1	Guadalupe de los Pozos	Zacatecas	22°20'57.2"	101°37'23.4"
6	1	2	3	Guadalupe Victoria	Zacatecas	22°27'25.2"	101°28'43.9"
7	2	-	5	Pámanes	Zacatecas	22°39'06.4"	101°57'19.1"
9	3	4	2	Pinos	Zacatecas	22°17'45.3"	101°34'39.4"
1	-	-	1	Salinas de Hidalgo	San Luis Potosí	22°37'38.7"	101°42'52.2"
8	2	2	4	San Juan Sin Agua	San Luis Potosí	22°31'32.1"	101°41'24.8"
6	3	2	1	Santiago	Zacatecas	22°27'25.2"	101°28'43.9"
5	3	1	1	Trinidad	Zacatecas	22°27'25.2"	101°28'43.9"
5	1	3	1	Villa Hidalgo	Zacatecas	22°23'31.96"	101°44'26.4"
6	-	2	4	Zacatal	Zacatecas	22°27'25.2"	101°28'43.9"
Total = 74	21	22	31				

finalidad de identificar las limitantes y estrategias de manejo y conservación en la actividad-recolecta de insectos comestibles. La semiestructuración de la entrevista permitió que los actores clave se expresaran en sus respuestas, por lo que estas duraron aproximadamente entre 20 min y 30 min por persona. Cada uno de los recolectores dio su consentimiento a usar sus respuestas y difundir la información; dicho consentimiento obra a través de la firma de cada una de las entrevistas.

Segunda fase

Para complementar las limitantes y estrategias de manejo y conservación identificadas en las entrevistas individuales de la primera fase, se organizó el Foro Regional de Recolectores de Insectos Comestibles, para delimitar y priorizar de manera grupal las estrategias de manejo y conservación de insectos comestibles. Este evento se realizó el día 24 de mayo de 2024, en las instalaciones del

Colegio de Postgraduados Campus San Luis Potosí.

Al foro asistieron 35 actores clave de la actividad-recolecta de insectos comestibles, en su mayoría los que participaron en las entrevistas individuales. Adicionalmente, en el foro participó el comisariado de la comunidad de Pinos, Zacatecas, 3 estudiantes y 3 profesores del Colegio de Posgraduados del Posgrado de Innovación en Manejo de Recursos Naturales. También asistió un estudiante doctoral de la Universidad Autónoma de Zacatecas, un profesor del Instituto de Zonas Desérticas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (USALP) y un estudiante Postdoctoral de la Coordinación para la Innovación y la Aplicación de la Ciencia y Tecnología de la UASLP, todos ellos dedicados al estudio de insectos comestibles. Adicionalmente, asistieron tres acopiadores de insectos comestibles en el Altiplano Potosino-Zacatecano.

Durante el desarrollo del foro se promovió la participación de todos los asistentes, permitiendo una visión integral de las problemáticas que enfrenta el sector y fomentando la generación de soluciones conjuntas. El foro regional se desarrolló en 3 etapas: 1) identificación de factores limitantes, 2) propuesta de estrategias de manejo y conservación y 3) priorización de acciones.

Para identificar los factores limitantes se empleó la técnica de lluvia de ideas y estimulación de la reflexión y el diálogo entre los recolectores. Los facilitadores (profesores), guiaron las discusiones asegurando que se cubrieran aspectos clave obtenidos de las entrevistas, como la disminución de la disponibilidad de insectos, la falta de apoyos institucionales y la pérdida del hábitat de dichas especies. Al final de esta etapa, cada uno de los actores clave identificó las limitantes más relevantes.

Para definir la propuesta de estrategias de manejo y conservación, se elaboró una lista de las limitantes, eliminando repeticiones, las cuales se presentaron a los participantes. Con la información de las limitantes, cada uno de los participantes colaboró en las estrategias de manejo y conservación de insectos comestibles, esta información se registró en un archivo Microsoft Excel, versión 16.0.

La matriz de priorización de acciones se construyó con la selección de las 5 limitantes y las 5 estrategias de manejo y conservación de cada uno de los participantes, las cuales, de acuerdo con su parecer, eran las más relevantes. Adicionalmente, en esta etapa se discutieron los próximos pasos, incluyendo la necesidad de formalizar acuerdos con las autoridades locales para dar seguimiento a las propuestas resultantes de este foro.

Análisis estadístico

Análisis de componentes principales (ACP)

Para reducir la variabilidad de la priorización de la percepción de los actores clave en tres ejes que explicaran la mayor varianza de las limitantes y estrategias identificadas en el

Foro Regional de Recolectores de Insectos Comestibles, se sometieron a un ACP (Pearson, 1901; Rentería y col., 2011). Esto, con el propósito de describir la mayor variación posible en menos dimensiones, minimizando la pérdida de información. Para ello, se utilizó el paquete estadístico XLSTAT, versión 2024.2.2. Se interpretó el biplot, que representa las agrupaciones distintivas de las limitantes y/o estrategias (variables activas), priorizadas por diferentes grupos de actores (P1, P2, P3, P4 y P5: observaciones activas) según sus intereses, de acuerdo a sus contextos institucionales, sociales y ecológicos. La vinculación entre ambos parámetros, a través de los patrones de asociación, indica que son limitantes y/o estrategias clave desde la perspectiva de los entrevistados, independientemente de su frecuencia expresada.

Análisis de Clusterización Aglomerativa Jerárquica (CAJ)

Para determinar gráficamente disimilitudes o diferencias entre las limitantes, estrategias y su priorización, de acuerdo con la percepción de los actores clave, se analizaron dichas variables mediante un análisis de CAJ. Este análisis es de tipo multivariado, y logra minimizar un conjunto de datos grande y complejo a una pequeña cantidad de grupos de datos, llamados clúster, en donde los miembros de algunos de los grupos llegan a compartir características similares, por lo que se les denomina amalgamaciones (Lin y Chen, 2006). El análisis se realizó con el paquete estadístico XLSTAT versión 2024.2.2.

RESULTADOS

Características de la población estudiada

La mayoría de los actores clave involucrados en la recolección, que participaron en el foro, eran hombres (90.3 %). El 38.7 % de la muestra eran adultos de 52 a 84 años de edad, 45.12 % de 32 a 51 años y 16.1 % jóvenes de 19 a 31 años. El 6.4 % no contaba con estudios, 35.5 % cursó primaria, 48.4 % secundaria y 9.7 % preparatoria. Al ser la recolecta de insectos comestibles una actividad productiva complementaria, el 54.8 % manifestó de-

dicarse a la agricultura, 16.1 % a la construcción, 6.4 % a la ganadería, y 22.7 % a otras actividades económicas.

Diagnóstico de la actividad-recolecta

Alrededor del 60 % tenía más de 15 años dedicados a esta actividad y el 64.5 % operaba principalmente en tierras ejidales (Tabla 2).

El 97 % de los entrevistados manifestaron sentir que la producción de estos insectos ha disminuido a través del tiempo, debido principalmente al sobrepastoreo en las zonas de recolección (para ambos gusanos), por la presencia generalizada de ganado, especialmente bovino (para gusano rojo) y caprino (para los dos gusanos), así como, a las sequías (escamol y gusano rojo) y prácticas de manejo inadecuado de nidos (escamol).

La mayoría de los recolectores (61.3 %) no recibía apoyo gubernamental (Tabla 2). Los que manifestaron recibir algún tipo de apoyo era a través de acciones no relacionado con la actividad de recolecta de insectos comestibles. Esta falta de programas de financiamiento limita la implementación de estrategias sostenibles y la adaptación a los desafíos ambientales para la conservación del recurso y preservación la actividad.

Asimismo, en la Tabla 2 se muestran factores relacionados a los insectos y su hábitat, como los tipos de nido, tamaño de colonia, sustrato de anidación y forrajeo más habituales en el caso de la hormiga escamolera y características morfológicas de los gusanos y el agave hospedero, con el fin de comparar información reportada en estudios anteriores relacionados con los insectos comestibles y las diferencias de recolección y producción en otras áreas de aprovechamiento.

Limitantes identificadas

Se identificaron 14 limitantes en la actividad-recolecta de insectos comestibles. De estas, las más relevantes fueron, el manejo inadecuado de nidos (el cual solo aplica para el aprovechamiento del escamol) (31), la extrac-

ción clandestina (26), informalidad del mercado (compradores diversos sin compromisos) (17), ausencia de normativas y regularización legal (16) y destrucción del maguey y nopal (16), estas últimas afectando a las tres especies de insectos (Tabla 3).

Análisis de componentes principales (limitantes)

El ACP explicó el 95 % de la varianza acumulada. Las variables con los valores más significativos del Componente 1 (CP1) fueron: falta de control comprador/recolector/comisariado (0.868), destrucción del sustrato (maguey/nopal) (0.827) y conflictos ejidales (0.793). El CP2 refleja la competencia por los recursos naturales con otras actividades, como el sobrepastoreo (0.644), la agricultura, la extracción clandestina y la renta duplicada de la tierra, las tres con el mismo valor (0.523); y el CP3 muestra la ganadería (0.624) y la informalidad del mercado (0.496) y la ausencia de normativas y regularización legal (0.447) como factores significativos que también limitan la actividad (Tabla 3).

Agrupaciones de limitantes

Las limitantes se priorizaron en función de los diferentes grupos de actores (observaciones activas) (Figura 1). El eje horizontal (F1) explica el 48.77 % de la varianza total en los datos, ubicándolo como la dimensión más importante para entender las relaciones entre las limitantes y su priorización de acción. El lado derecho se asocia con conflictos locales y de organización; en tanto que el lado izquierdo lo está con el manejo inadecuado de los nidos. Este eje, se complementa con el eje F2 que explica el 24.67 % de la varianza, por lo que en conjunto explican más del 73 %. El segundo eje (F2) se encuentra relacionado con el uso intensivo de la tierra frente a actividades tradicionales, así como la extracción clandestina (lado izquierdo) y la falta de regulación o planificación (lado derecho).

La observación activa P1 se ubica en el cuadrante inferior izquierdo (elipse roja) y se relaciona con el manejo inadecuado de nidos;

■ Tabla 2. Diagnóstico de la recolecta de escamol, gusano rojo y gusano blanco en el Altiplano Potosino-Zacatecano.

Tabla 2. Diagnosis of the collection of escamol, red worm and white worm in the Potosino-Zacatecano Highland.

Variables	Categoría	Escamol		Gusano rojo		Gusano blanco	
		Menciones		Menciones		Menciones	
		n	%	n	%	n	%
Factores asociados a la producción							
Experiencia*	Mucha	18	58.1	11	52.4	15	68.2
	Poca	9	29.0	7	33.3	4	18.2
	Sin ella	4	12.9	3	14.3	3	13.6
Lugar de recolecta	Ejido	20	64.5	15	71.4	16	72.7
	Renta	10	32.3	6	28.6	6	27.3
	Propiedad privada	1	3.2				
Presencia de ganado	Sí	28	90.3	21	100	22	100
	No	3	9.7				
Tipo de ganado	Bovino	21	67.7	12	57.1	15	68.2
	Ovino	4	12.9	3	14.3	1	4.5
	Caprino	3	9.7	6	28.6	6	27.3
	No aplica	3	9.7				
Estatus de producción	Ha disminuido	29	93.5	21	100	22	100
	Se ha mantenido	2	6.5				
Causas de la disminución	Manejo inadecuado	15	48.4	3	14.3	1	4.5
	Sequías	7	22.6	4	19	9	40.9
	Sobre recolección	3	9.7	2	9.5	1	4.5
	Extracción furtiva	4	12.9	3	14.3	1	4.5
	Frío extremo	1	3.2				
	Sobrepastoreo	1	3.2	9	42.9	10	45.6
Estatus de recolectores	Ha aumentado	14	45.2	8	38.1	2	9.1
	Se ha mantenido	9	29.0	3	14.3	6	27.3
	Ha disminuido	8	25.8	10	47.6	14	63.6
Apoyo gubernamental	No	19	61.3	13	61.9	12	54.5
	Sí	12	38.7	8	38.1	10	45.5
Tipo de apoyo	No reciben	19	61.3	13	61.9	12	54.5
	Becas educativas	7	22.6	7	33.3	9	40.9
	Productivos	4	12.9	1	4.8	1	4.5
	Tercera edad	1	3.2				
Factores asociados a los organismos y su hábitat							
Tipo de nido	Tapón	13	41.9				
	Nuevo	13	41.9				
	Iguales	5	16.1				
Tamaño de colonia	Grande	31	100				

Continúa...

Sustrato de anidación	Magüey	15	48.4				
	Clavellina	5	16.1				
	Lechuguilla	4	12.9				
	Suelo	2	6.5				
	Nopal	3	9.7				
	Palma	1	3.2				
	Huizache	1	3.2				
Sustrato de forrajeo	Palma	12	38.7				
	Magüey	8	25.8				
	Nopal	7	22.5				
	Lechuguilla	2	6.5				
	Cardón	2	6.5				
Tamaño del magüey	Pequeño			2	9.5		
	Mediano			14	66.7	5	22.7
	Grande			5	23.8	17	77.3
Tamaño de las pencas	Mediano					8	36.4
	Grande					14	63.6
Coloración del magüey	Amarillo					11	50
	Naranja					7	31.8
	Café					4	18.2
	Amarilloso			12	57.1		
	Café			9	42.9		
Color del gusano rojo	Rojo			13	61.9		
	Rosado oscuro			8	38.1		

*Aunque todos tenían más de 5 años de experiencia se autocategorizaron en estas tres escalas.

en tanto que la observación activa P3, que aunque está agrupada también a esta variable activa, se encuentra cercana a las variables de ganadería y la destrucción del sustrato (magüey y nopal) (elipse azul), que los colectores consideran factores que afectan los nidos y la colección de los gusanos. En la parte superior izquierda se encuentra P2 (elipse amarilla), asociada al sobrepastoreo y la extracción clandestina que afectan la producción y la rentabilidad. En el cuadrante opuesto (elipse azul) se encuentra P4, que está asociada a variables como la falta de control en la recolección, conflictos ejidales y falta de control comprador/recolector/comisariado. En la parte superior derecha (elipse verde) se ubica P5, asociada a la ausencia de normativas y horarios de recolecta inadecuados.

Análisis de Clusterización Aglomerativa Jerárquica para limitantes (CAJ)

La CAJ para las limitantes conformó dos clústeres. El clúster 1 señala un problema especí-

fico y grave, como lo es el manejo inadecuado de nidos (hormiga escamolera), que requiere un tratamiento puntual y diferenciado, mientras que el clúster 2 agrupa un conjunto de limitantes interconectadas, que afectan la recolección debido a factores externos como la gestión del territorio, las normativas insuficientes y los aspectos socioeconómicos (Figura 2).

Estrategias de manejo y conservación propuestas

Los actores clave en la actividad-recolecta de insectos comestibles priorizaron un total de 21 estrategias, siendo las más frecuentes la reforestación (18), control en la compra-venta (16), comunicación y organización ejidal (14), herramientas adecuadas (14) y conformación de comités de vigilancia (13) (Tabla 4).

Análisis de componentes principales (estrategias de manejo y conservación)

El ACP explicó el 95 % de la varianza acumulada. Las variables más sobresalientes del

■ Tabla 3. Limitantes identificadas desde la perspectiva de actores clave en la recolecta de insectos comestibles en el Altiplano Potosino-Zacatecano y varianza acumulada con relación a los tres componentes principales.

Table 3. Limitations identified from the perspective of key stakeholders in the collection of edible insects in Potosino-Zacatecano Highland and accumulated variance in relation to the three main components.

	Limitantes	Identificador	No. menciones	Varianza acumulada		
				CP1	CP2	CP3
1	Manejo inadecuado de nidos	ImHand	31	0.604	0.099	0.278
2	Extracción clandestina	ClanExt	26	0.145	0.523	0.309
3	Informalidad del mercado	BuyWoCm	17	0.154	0.342	0.496
4	Ausencia de normativas y regularización legal	AbsReg	16	0.406	0.120	0.447
5	Destrucción del sustrato (maguey/nopal)	SubsDest	16	0.827	0.039	0.006
6	Horarios de recolecta inadecuados	InappSh	15	0.775	0.083	0.028
7	Falta de control comprador/recolector/comisariado	BuColCon	11	0.868	0.020	0.105
8	Sobrepastoreo	Ovrgrz	10	0.089	0.644	0.245
9	Ausencia reglamentación interna	AbsInReg	10	0.650	0.011	0.112
10	Conflictos ejidales	EjidConf	7	0.793	0.002	0.204
11	Ausencia de control en la recolecta	ContLac	6	0.653	0.199	0.048
12	Ganadería	CattRai	4	0.037	0.328	0.624
13	Agricultura	Agric	3	0.413	0.523	0.064
14	Renta duplicada de la tierra	DupliRen	3	0.413	0.523	0.064

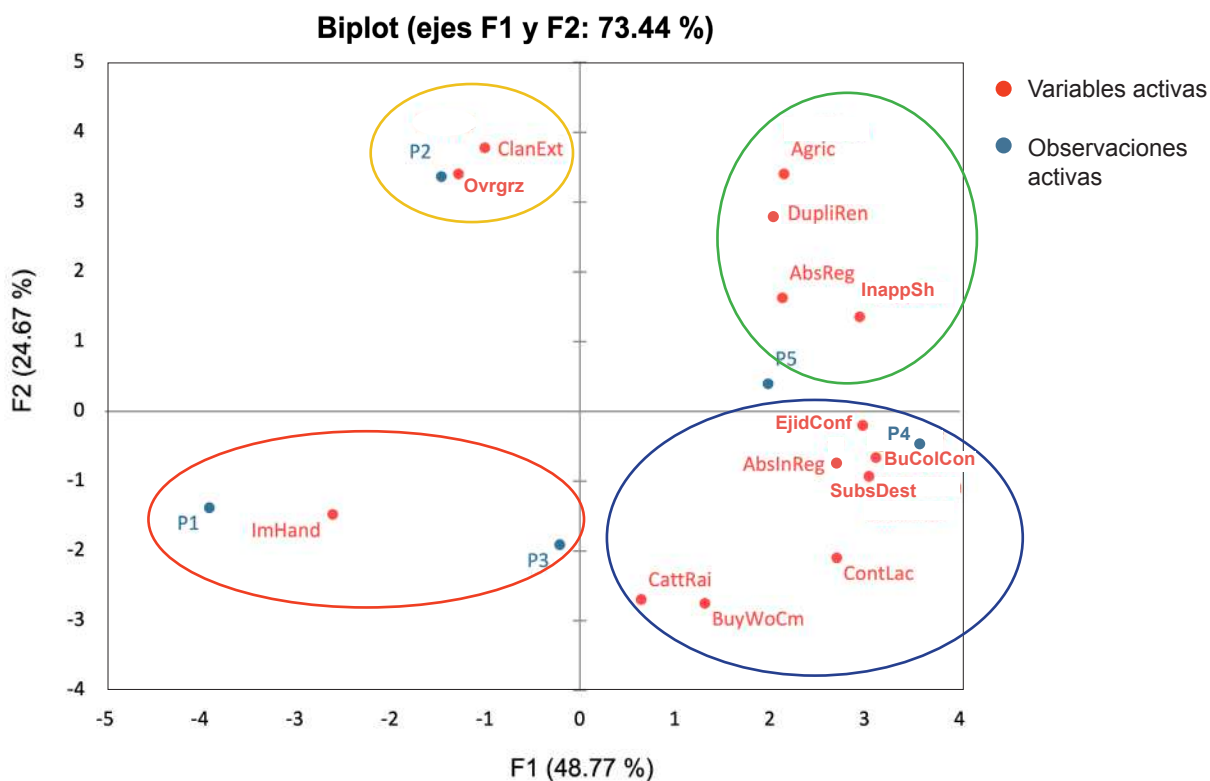
Componente 1 (CP1) son diagnósticos ambientales (0.913), centros de acopio (0.805), cercos de exclusión y paquetes tecnológicos (0.774 cada una) y comunicación y organización ejidal (0.747); en el CP2 son control y monitoreo de nidos (0.888), compromiso ambiental (0.843) y reforestación (0.620). Asimismo, las variables más significativas del CP3 son control de compra-venta (0.753), certificación técnica (0.581) y actividad turística (0.387) (Tabla 4).

Agrupación de estrategias

Las estrategias se priorizaron en función de los diferentes grupos de actores (observaciones activas) (Figura 3). El primer eje (F1) explica el 38.12 % de la varianza total en los datos, porcentaje similar al del eje F2, con 31.85 %, por lo que las dos dimensiones tienen una importancia cercana para entender

las relaciones entre las estrategias y su priorización de acción. El eje F1, en el lado derecho destaca estrategias centradas en el fortalecimiento institucional y organizativo, como la comunicación y organización ejidal. En tanto que, el lado izquierdo se relaciona con la legalidad. El segundo eje (F2), en el lado derecho destaca la organización y compromiso entre los compradores/recolectores y vigilancia regional, en tanto que, el lado izquierdo agrupa estrategias relacionadas con el conocimiento técnico y la educación ambiental, como capacitaciones y certificaciones técnicas.

El biplot delimita cuatro grandes grupos ubicados en sus respectivos cuadrantes en donde se reflejan perfiles distintos de interés por parte de los participantes, distribución que pone de relieve cómo los diferentes actores



ImHand: Manejo inadecuado de nidos; ClanExt: Extracción clandestina; BuyWoCm: Informalidad del mercado; AbsReg: Ausencia de normativas y regularización legal; SubsDest: Destrucción del sustrato (maguey/nopal); InappSh: Horarios de recolecta inadecuados; BuColCon: Falta de control comprador/recolector/comisariado; Ovrgrz: Sobrepastoreo; AbsInReg: Ausencia reglamentación interna; EjidConf: Conflictos ejidales; ContLac: Ausencia de control en la recolecta; CattRai: Ganadería; Agric: Agricultura; DupliRen: Renta duplicada de la tierra.

■ **Figura 1. Contribución porcentual de la varianza acumulada de las limitantes, con relación a su priorización (P1, P2, P3, P4, P5).**

Figure 1. Percentage contribution of the cumulative variance of the identified limitations in relation to their prioritization (P1, P2, P3, P4, P5).

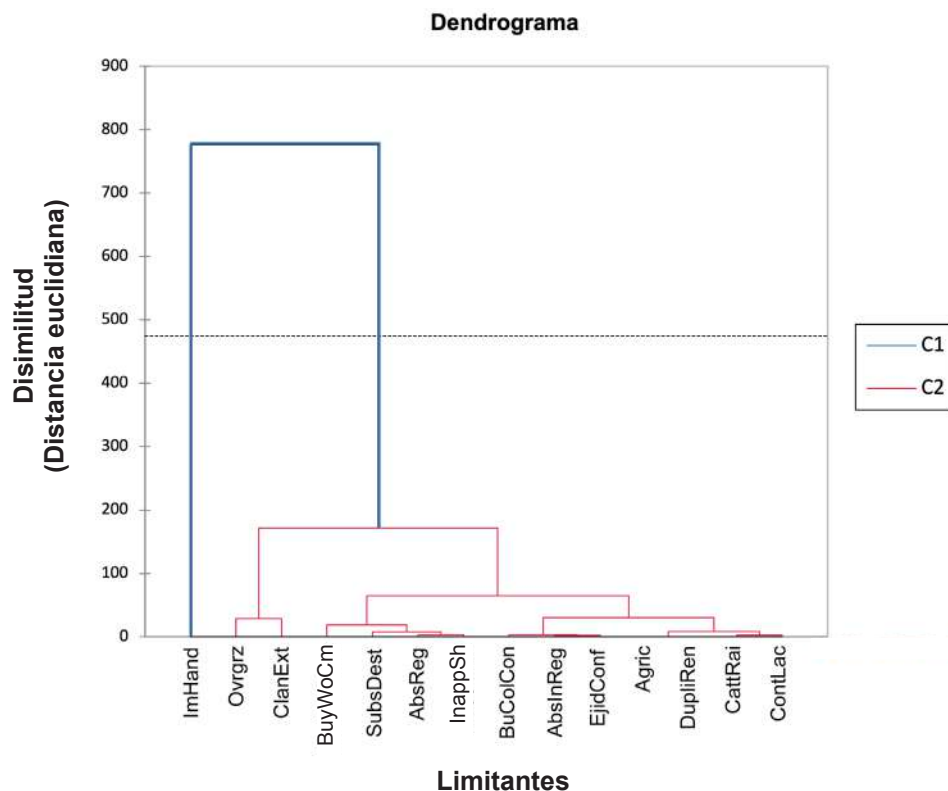
priorizan estrategias según sus contextos y capacidades únicas.

En el cuadrante superior izquierdo (elipse amarilla), se muestra una agrupación que incluye variables como tecnologías certificadas, transferencia tecnológica y educación ambiental. Este cuadrante está fuertemente vinculado a los grupos P2 y P3, sugiriendo un perfil caracterizado por una alta adopción de tecnologías certificadas y transferidas. Estos grupos se encuentran claramente separados de los demás, lo que indica un enfoque en actividades impulsadas por la tecnología en lugar de la gestión o conservación ambiental directa (cuadrante opuesto). Aunque muestran

interés en la educación ambiental, sus prioridades se inclinan hacia la formación para el uso de tecnologías en lugar de actividades prácticas como la reforestación.

En el cuadrante superior derecho (elipse roja) se engloban actividades de conservación, control social y vigilancia, que se agrupan estrechamente, lo que indica una correlación positiva entre ellas. Aunque las variables representan en conjunto un perfil ideal para prácticas sostenibles, no fueron altamente priorizadas por ningún grupo.

En el cuadrante inferior izquierdo (elipse azul) se observan variables definidas por un enfo-



ImHand: Manejo inadecuado de nidos; Ovrgrz: Sobrepastoreo; ClanExt: Extracción clandestina; BuyWoCm: Informalidad del mercado; SubsDest: Destrucción del sustrato (maguey/nopal); AbsReg: Ausencia de normativas y regularización legal; InappSh: Horarios de recolecta inadecuados; BuColCon: Falta de control comprador/recolector/comisariado; AbsInReg: Ausencia reglamentación interna; EjidConf: Conflictos ejidales; Agric: Agricultura; DupliRen: Renta duplicada de la tierra; CattRai: Ganadería; ContLac: Ausencia de control en la recolecta.

■ **Figura 2. Clusterización Aglomerativa Jerárquica para las limitantes identificadas por los actores clave en la actividad-recolecta de insectos comestibles en el Altiplano Potosino-Zacatecano.**

Figure 2. Hierarchical Agglomerative Clustering for the limitations identified by key stakeholders in the edible insect harvesting-activity in the the Potosino-Zacatecano Highland.

que en aspectos legales, manejo estratégico del ganado y comités de vigilancia, alineándose con el grupo P1. Este grupo exhibe un perfil orientado hacia la gobernanza legal de recursos y el manejo ambiental práctico, pero con poca asociación con tecnología, conservación, o educación ambiental, y aunque buscan un marco legal, no consideran las acciones que se asocian con la sostenibilidad (cuadrante opuesto).

En el cuadrante inferior derecho (elipse verde) se observan actividades de reforestación, gestión, centros de acopio, cercos de exclusión de ganado y diagnósticos ambientales, asociadas con los grupos P4 y P5. Los interesados en estas acciones podrían estar uti-

lizando tecnologías específicas (TecPac), pero no muestran una fuerte conexión con capacitaciones o certificaciones técnicas (cuadrante superior izquierdo).

Análisis de clusterización jerárquica (ACJ) para las estrategias propuestas

Los resultados del ACJ para los datos de las estrategias propuestas de los actores clave, evidencian la conformación de tres clústeres. El primer clúster se enfoca en la gestión y capacitación técnica, con propuestas como normatividad legal, manejo estratégico del ganado y comités de vigilancia. El segundo clúster destaca estrategias de conservación y organización comunitaria, como la reforestación, organización ejidal y control de

■ Tabla 4. Estrategias de manejo y conservación propuestas por actores clave en la recolecta de insectos comestibles en el Altiplano Potosino-Zacatecano y varianza acumulada con relación a los tres componentes principales.

Table 4. Management and conservation strategies proposed by key stakeholders in the collection of edible insects in the Potosino-Zacatecano Highland and accumulated variance in relation to the three main components.

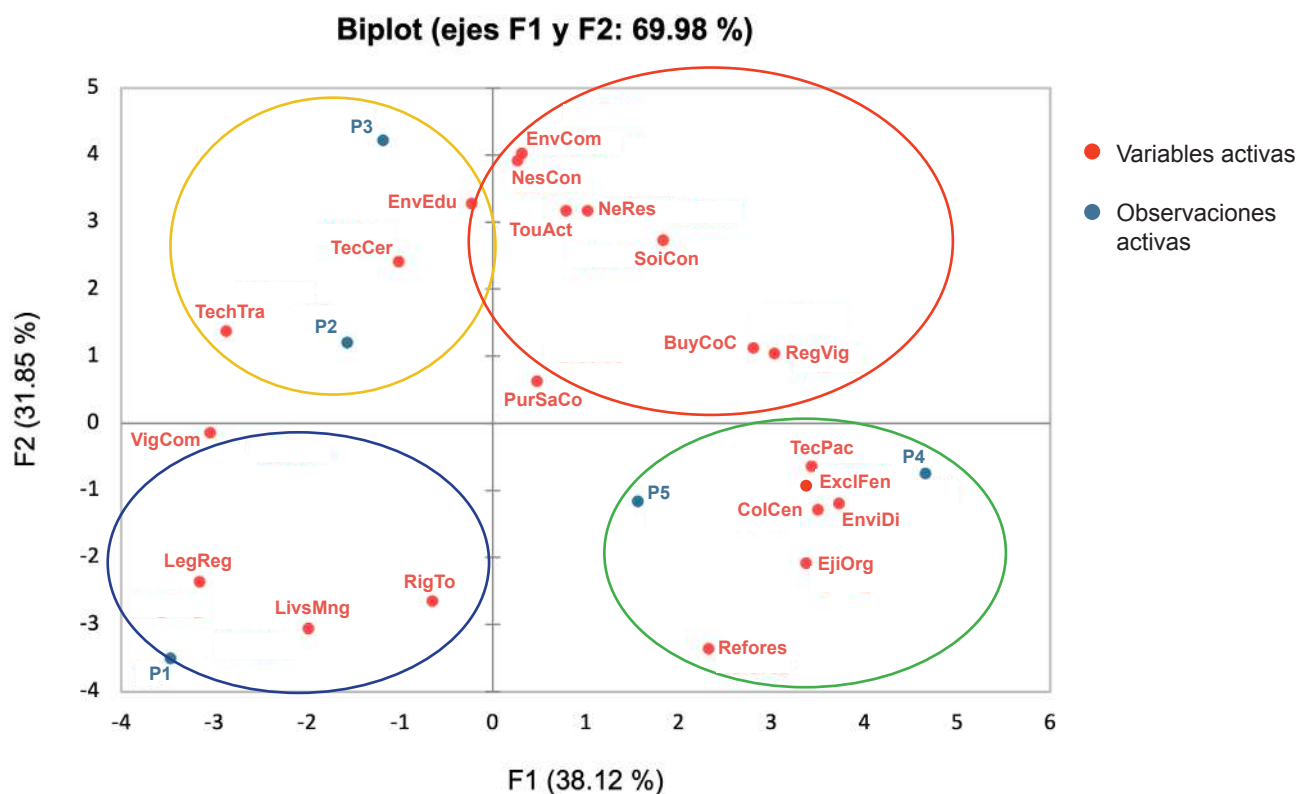
	Estrategias	Identificador	Frecuencia	Varianza acumulada		
				CP1	CP2	CP3
1	Reforestación	Refores	18	0.355	0.620	0.000
2	Control compra/venta	PurSaCo	16	0.015	0.022	0.753
3	Comunicación y organización ejidal	EjiOrg	14	0.747	0.239	0.003
4	Herramientas adecuadas	RigTo	14	0.028	0.386	0.367
5	Comités de vigilancia	VigCom	13	0.608	0.001	0.058
6	Normatividad legal	LegReg	12	0.655	0.307	0.002
7	Descanso de nidos/agaves	NeRes	10	0.068	0.551	0.380
8	Capacitaciones técnicas	TechTra	9	0.541	0.103	0.201
9	Manejo estratégico del ganado	LivsMng	8	0.259	0.515	0.165
10	Compromiso comprador/recolector	BuyCoC	8	0.516	0.069	0.205
11	Conservación del suelo	SoiCon	7	0.221	0.410	0.367
12	Educación ambiental	EnvEdu	7	0.003	0.590	0.382
13	Vigilancia regional	RegVig	7	0.605	0.059	0.113
14	Control y monitoreo de nidos	NesCon	6	0.006	0.888	0.079
15	Diagnósticos ambientales	EnviDi	5	0.913	0.078	0.002
16	Cercos de exclusión	ExclFen	4	0.774	0.023	0.143
17	Compromiso ambiental	EnvCom	4	0.005	0.843	0.041
18	Certificación técnica	TecCer	4	0.068	0.318	0.581
19	Paquetes tecnológicos	TecPaq	4	0.774	0.023	0.143
20	Actividad turística	TouAct	3	0.041	0.552	0.387
21	Centros de acopio	ColCen	2	0.805	0.091	0.001

la compra-venta. Finalmente, el tercer clúster agrupa propuestas variadas que incluyen la conservación del suelo, la educación ambiental y la cooperación entre actores. Estos enfoques buscan fortalecer tanto la sostenibilidad ambiental como la eficiencia en la recolección (Figura 4).

DISCUSIÓN

El diagnóstico de la actividad-recolecta de insectos comestibles en el Altiplano Potosino-

Zacatecano reveló la disminución en la producción de estas especies; así como las causas, atribuidas por los actores clave, las cuales resaltan la urgencia de adoptar prácticas de manejo sostenible en las zonas de recolección. La dependencia de técnicas tradicionales, aunque beneficiosa en muchos casos, puede no ser suficiente ante las presiones externas que enfrenta el medio ambiente, como el cambio climático o la expansión ganadera y agrícola (Mendoza y col., 2019).



Refores: Reforestación, PurSaCo: Control compra/venta, EjiOrg: Comunicación y organización ejidal, Rigto: Herramientas adecuadas, VigCom: Comités de vigilancia, LegReg: Normatividad legal, NeRes: Descanso de nidos/agaves, TechTra: Capacitaciones técnicas, LivsMng: Manejo estratégico del ganado, BuyCoC: Compromiso comprador/recolector, SoiCon: Conservación del suelo, EnvEdu: Educación ambiental, RegVig: Vigilancia regional, NesCon: Control y monitoreo de nidos, EnviDi: Diagnósticos ambientales, ExclFen: Cercos de exclusión, EnvCom: Compromiso ambiental, TecCer: Certificación técnica, TecPac: Paquetes tecnológicos, TouAct: Actividad turística, ColCen: Centros de acopio.

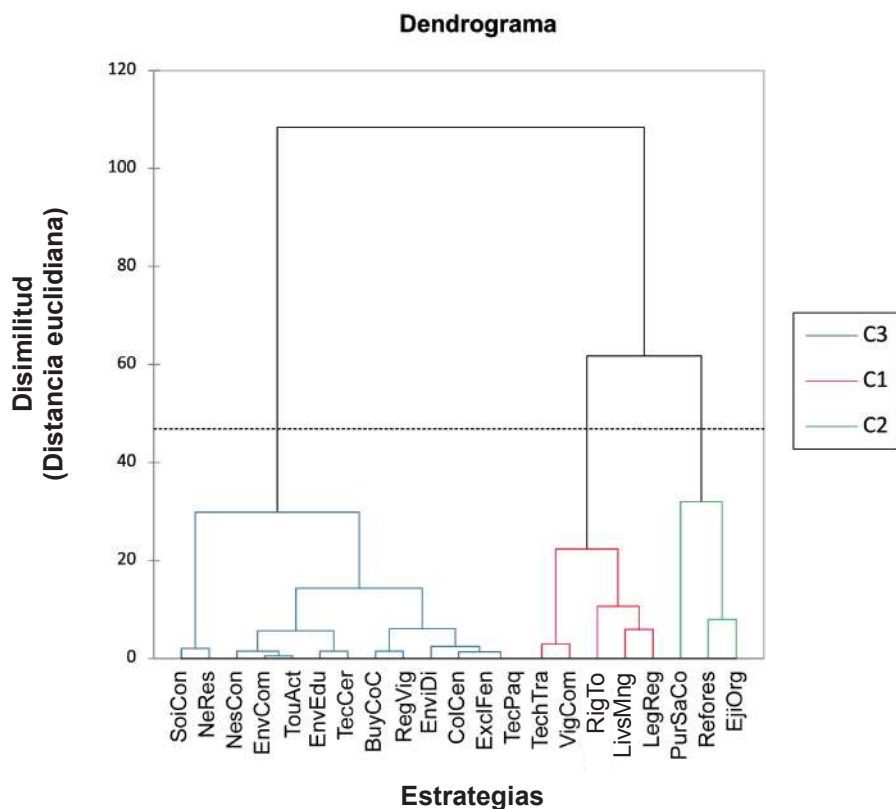
■ **Figura 3. Contribución porcentual de la varianza acumulada de las estrategias de conservación con relación a su priorización.**

Figure 3. Percentage contribution of the cumulative variance of conservation strategies in relation to the prioritization.

De acuerdo a la información obtenida de las entrevistas individuales y el hecho de que la mayor parte de la recolección ocurra en ejidos, destaca la importancia de la gestión comunal de sus recursos naturales. Sin embargo, sin el apoyo técnico y financiero adecuado, estos espacios pueden sufrir de sobreexplotación, especialmente cuando las regulaciones locales no son lo suficientemente estrictas o cuando no se implementan prácticas de regeneración adecuadas en zonas áridas y semi-áridas (Tarango, 2005). Además, la presencia significativa de ganado en las zonas de recolección subraya la competencia entre el uso

del suelo para la ganadería y la preservación de los ecosistemas, lo que ha sido documentado como una causa clave en la degradación de los hábitats nativos (Esparza y col., 2008; Hernández y col., 2017).

Asimismo, el apoyo productivo gubernamental limitado hacia los recolectores plantea preguntas sobre la viabilidad a largo plazo de esta actividad. Sin la intervención adecuada, es probable que la producción siga disminuyendo, lo que afectaría la economía local y la biodiversidad. Algunos estudios han señalado la importancia de políticas públicas enfoca-



SoiCon: Conservación del suelo; NeRes: Descanso de nidos/agaves; NesCon: Control y monitoreo de nidos; EnvCom: Compromiso ambiental; TouAct: Actividad turística; EnvEdu: Educación ambiental; TecCer: Certificación técnica; BuyCoC: Compromiso comprador/recolector; RegVig: Vigilancia regional; EnviDi: Diagnósticos ambientales; ColCen: Centros de acopio; ExclFen: Cercos de exclusión; TecPaq: Paquetes tecnológicos; TechTra: Capacitaciones técnicas; VigCom: Comités de vigilancia; RigTo: Herramientas adecuadas; LivsMng: Manejo estratégico del ganado; LegReg: Normatividad legal; PurSaCo: Control compra/venta; Refores: Reforestación; EjiOrg: Comunicación y organización ejidal.

■ **Figura 4. Clusterización Aglomerativa Jerárquica para las estrategias de conservación registradas de los actores clave en la actividad-recolecta de insectos comestibles en el Altiplano Potosino-Zacatecano.**

Figure 4. Hierarchical Agglomerative Clustering for the conservation strategies documented from key stakeholders in the edible insect harvesting-activity in the Potosino-Zacatecano Highland.

das en programas productivos y de capacitación, que no solo proporcionen recursos, sino que también fomenten la adopción de prácticas sostenibles (Ramos y col., 2006). La implementación de incentivos efectivos podría mejorar tanto la producción como la sostenibilidad del entorno en el que se desarrolla esta actividad.

De acuerdo a los factores asociados a los insectos y su hábitat, en el caso de la hormiga escamolera, se señala que, los tamaños de colonia con mayor producción son las colonias grandes, asimismo el sustrato de ani-

dación más habitual es el maguey (*A. salmiana*) y el sustrato de forrajeo es la palma (*Yucca* spp), lo que concuerda con lo reportado por (Romero y col., 2024b), quienes señalaron que el maguey fue el sustrato preferido por *L. apiculatum* para anidar, asimismo, indicaron que las colonias con más producción son las grandes. Rafael y col. (2017), resaltaron que el sustrato de forrajeo preferido por esta especie es la *Yucca* spp (el cual coincide por lo reportado por los actores clave en las entrevistas) y que la relación entre el sustrato de anidación y el sustrato de forrajeo implica un mayor esfuer-

zo de las hormigas, debido a que recorre largas distancias para forrajear en *Yucca* spp, ya que, aunque exista un mayor volumen de alimento, su densidad poblacional es menor.

Los resultados del Foro Regional de Recolectores de Insectos Comestibles revelaron diversas limitantes que afectan significativamente la sostenibilidad y el desarrollo de esta actividad en la región. El manejo inadecuado de nidos, identificado como la prioridad principal, es un reflejo directo de la falta de capacitación y conocimiento técnico de los recolectores sobre prácticas de conservación. Este problema es común, y el manejo inadecuado de los insectos comestibles no solo afecta su regeneración natural, sino que también pone en riesgo la biodiversidad de los ecosistemas locales (Berumen y col., 2021). La extracción clandestina ocurre en las tierras ejidales y privadas, como un reflejo de la carencia de regulaciones y falta de supervisión en las áreas de recolección (De-Luna y col., 2013). La ausencia de una normativa legal clara y efectiva coincide con investigaciones previas que sugieren que la falta de un marco legal sólido facilita la explotación ilegal de los recursos naturales (Hernández, 2021). Este problema se agrava por la destrucción de componentes del hábitat clave para el desarrollo de las poblaciones de insectos comestibles como lo es el maguey y el nopal, plantas que proporcionan un entorno esencial para muchas de esas especies. La transformación de estos hábitats, ya sea por expansión agrícola o sobrepastoreo advierte que la degradación de los ecosistemas afecta directamente la disponibilidad de insectos, poniendo en riesgo la viabilidad de dicha práctica (Cruz y col., 2014; García y col., 2023b). Investigaciones previas han señalado que la combinación de factores ambientales, como la baja precipitación, cambios en el uso de la tierra y las prácticas inadecuadas de manejo pueden tener un impacto devastador en la capacidad de recuperación de los ecosistemas que sostienen esta actividad (Berumen y col., 2021; Romero y col., 2024a).

Además, la falta de compromiso por parte de los compradores y la desorganización entre recolectores, compradores y comisariados revelan una falta de coordinación en la cadena de valor, lo que limita el desarrollo de un mercado estable y justo para los recolectores, quienes a menudo trabajan en condiciones desfavorables (Soto, 2021). La fragmentación de esta cadena y la ausencia de acuerdos formales afectan tanto la eficiencia en el uso de recursos como la sostenibilidad del comercio (Tumbaco y col., 2022). Es esencial controlar dichos factores y revalorizar cada eslabón de la cadena para asegurar beneficios sostenibles a corto y largo plazo.

Otra limitante es la ausencia de regulación interna en las comunidades, reflejada en la falta de normas claras sobre tiempos, métodos y límites de recolección. Sin estos mecanismos, surgen conflictos y prácticas insostenibles, como horarios inadecuados de recolección que perjudican el ciclo de vida y las colonias de los insectos. La implementación de acuerdos comunitarios en cadenas de valor con enfoque agrícola resulta clave para fortalecer la economía regional y mejorar el bienestar de los productores rurales (Alviarez, 2021). En el Altiplano Potosino-Zacatecano, el aprovechamiento de insectos comestibles enfrenta desafíos como el cambio climático, la degradación de recursos naturales y las demandas del mercado, lo que requiere una organización comercial más eficiente. Políticas orientadas a mejorar la infraestructura, promover la innovación, proteger los derechos de propiedad intelectual y capacitar a los trabajadores son esenciales para integrar dicha actividad en cadenas de valor y fortalecer su sostenibilidad económica y cultural (Cavallo y Powell, 2021: 120).

Las limitantes como los conflictos por las rentas de los ejidos y la ausencia de control en la recolección reflejan la complejidad socioeconómica que subyace en la actividad recolectora. Estos factores no solo ponen en riesgo el recurso natural, sino que también fracturan las relaciones sociales dentro de

las comunidades rurales, lo que dificulta aún más la implementación de estrategias de manejo sostenible. La literatura sugiere que los modelos de intervención participativa, como los foros comunitarios, pueden ser un primer paso importante para alinear intereses y generar soluciones locales viables (Cárdenas y col., 2021).

Asimismo, el Foro Regional de Recolectores de Insectos Comestibles fue un medio para identificar diversas estrategias de conservación para el aprovechamiento de estas especies. Sin embargo, la estrategia de reforestación fue la más destacada, lo cual indica una clara preocupación por la degradación de los ecosistemas locales, en donde la pérdida de la cubierta vegetal trae consigo una reducción de la infiltración del agua y una pérdida de la biodiversidad. Por ello, la restauración de áreas degradadas, especialmente aquellas relacionadas con la destrucción del maguey y nopal, es crucial para revitalizar los hábitats que sostienen estas especies. El cambio climático, y el uso irracional del agua y del suelo, demandan continuamente acciones de reforestación (Urías y col., 2023).

Los cambios recurrentes en el precio de cada uno de los insectos comestibles, es una preocupación; por ello, los recolectores consideran que debe existir una regulación en el comercio de insectos comestibles, debido a que actualmente el precio lo establece el comprador, ocasionando un mercado inestable y condiciones laborales desiguales entre los recolectores (Briones y col., 2022). Un control más estricto sobre la venta y compra de estos productos podría estabilizar los precios y mejorar las condiciones de vida de los recolectores y sus familias.

La gestión colectiva de la actividad-recolecta de insectos comestibles, a través de la comunicación, la organización ejidal y la constitución de comités de vigilancia son esenciales para los actores clave, no obstante, la crisis actual en México, visible en los sistemas de salud, económico y político, ha puesto al desa-

rollo comunitario en un segundo plano frente a otras prioridades emergentes (Quiroz, 2021). Estos componentes son clave para fortalecer la gobernanza participativa y la toma de decisiones colaborativas, permitiendo un manejo sostenible de los recursos naturales y previniendo la extracción clandestina, que amenaza la sostenibilidad de dicha actividad. En este contexto, las zonas rurales, con su riqueza de conocimientos y experiencias, requieren una intervención eficiente y pertinente desde los ámbitos público y privado, para revalorar lo rural y fortalecer el papel de los campesinos en el desarrollo territorial y la conservación de los recursos (Jurado, 2022).

Como se ha descrito, son diversas las prioridades tendientes a realizar un aprovechamiento mejor de los insectos e incluye el diseño y uso de herramientas adecuadas y la aplicación de una normatividad legal apropiada. La creación de un marco legal ayudaría a proteger los ecosistemas y a mantener los ingresos económicos de los recolectores; además, evitaría la sobreexplotación y promovería prácticas sostenibles a largo plazo (Ramos y col., 2006; Berumen y col., 2021). A esta iniciativa se suma la necesidad de capacitación técnica, que permitiría a los recolectores adquirir habilidades para optimizar los procesos de extracción, minimizar los daños a las poblaciones de insectos y sus hábitats y mejorar la calidad del producto recolectado (Ramos y col., 2006). Para el caso del gusano blanco y rojo, el reto es mantener sus plantas hospedantes, específicamente los agaves.

Para la hormiga escamolera, el reto es cuidar y manejar adecuadamente sus nidos y colonias, e incrementar su producción, así como mantener sus sustratos de anidación y forrajeo. Sin duda, el descanso de nidos tendrá un efecto positivo en la producción e ingreso económico, el reto es convencer a todos los recolectores sobre esta iniciativa. Cabe señalar que no existen estudios sobre el descanso de nidos y su impacto en la producción, tampoco sobre el manejo estratégico del ganado en los sitios de recolecta de insectos comesti-

bles. Al respecto, se considera que la rotación de potreros es una estrategia clave en el manejo ganadero que optimiza el uso del forraje, mejora la calidad del pasto, previene el sobrepastoreo, maximiza la productividad, asegura la viabilidad a largo plazo del sistema ganadero y promueve la sostenibilidad del suelo (Senra, 1996; Senra y col., 2005). Adicionalmente, se ha establecido que las variaciones en el clima y el sobrepastoreo conllevan cambios en la estructura y en el funcionamiento de los ecosistemas, influyendo en la composición de las comunidades vegetales (Eltoum y col., 2015) y en la disponibilidad de sustratos hospedantes, forrajeros y de anidación para los insectos (Romero y col., 2024b).

El ACP sugiere que la falta de acuerdos formales y la competencia por el uso de tierras, combinados con la inexistencia de regulaciones claras, están socavando la actividad de aprovechamiento de insectos comestibles. Es evidente que los factores internos (falta de coordinación entre actores) y factores externos (sobrepastoreo y agricultura) limitan el potencial sostenible de dicha práctica. Se enfatiza que, para abordar estos desafíos, es crucial establecer normativas claras y fomentar una mayor cooperación entre los actores involucrados, además de implementar estrategias que promuevan un mercado más formal

y comprometido con la preservación de los ecosistemas.

CONCLUSIONES

La recolección de insectos comestibles en el Altiplano Potosino-Zacatecano enfrenta diversas limitantes. Para garantizar su continuidad, es fundamental fortalecer la regulación, promover la colaboración entre actores clave y mejorar las prácticas de manejo. La combinación de estos esfuerzos y la intervención social con actores clave en la actividad, permitirá mitigar los impactos negativos, asegurar un aprovechamiento responsable de los recursos naturales y con ello el desarrollo de las comunidades rurales. En conjunto, las estrategias referidas, relacionadas con la actividad-recolecta de insectos comestibles requieren de un enfoque holístico que integre aspectos sociales, económicos y ambientales. Las soluciones sostenibles en la gestión de los insectos comestibles deben involucrar no solo la protección del recurso en sí, sino también la creación de estructuras de gobernanza, mercado y educación que fortalezcan la cohesión comunitaria y aseguren la viabilidad a largo plazo de esta actividad.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declararon no tener conflictos de intereses de ningún tipo.

REFERENCIAS

- Alvarez, V. (2021). Cómo impulsar las cadenas de valor en un mundo afectado por la pandemia. Blogs BID Mejorando Vidas. [En línea]. Disponible en: <https://blogs.iadb.org/ideas-que-cuentan/es/como-impulsar-las-cadenas-de-valor-en-un-mundo-afectado-por-la-pandemia/>. Fecha de consulta: 15 de enero de 2025.
- Berumen, M., Valdez, R. D., Méndez, S. J., Cadena, J., Esparza, A. y Tarango, L. A. (2021). Determinación del estado de conservación de la hormiga “escamolera” (*Liometopum apiculatum* Mayr) en México por el método de evaluación de riesgo – MER. *Agrociencia*, 55, 539-535. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i6.2558>
- Briones, J. A., Tarango, L. A., Velázquez, A., Reyes, V. J., & Salazar, M. A. (2022). Edible insect harvest in Pinos, Zacatecas, Mexico. *Agroproductividad*. <https://doi.org/10.32854/agrop.v14i6.2275>
- Cárdenas, B. J., Tapia, J. I., Herrera, B. y Arcenales, A. S. (2021). La Intervención social durante el trabajo comunitario: Una guía para el desarrollo. *Domínio de las Ciencias*, 7(1), 954-965. <https://doi.org/10.23857/dc.v7i1.1740>
- Cavallo, E. y Powell, A. (2021). Oportunidades para un mayor crecimiento sostenible tras la pandemia. Banco Interamericano de Desarrollo -Informe macroeconómico de América Latina y el Caribe 2021. [Archivo PDF]. [En línea]. Disponible en: <https://publications.iadb.org/publications/spanish/docu->

ment/Informe-macroeconomico-de-America-Latina-y-el-Caribe-2021-Oportunidades-para-un-mayor-crecimiento-sostenible-tras-la-pandemia.pdf. Fecha de consulta: 15 de enero de 2025.

COEPLA, Coordinación Estatal de Planeación (2022). Fichas municipales, Pinos. Gobierno del Estado de Zacatecas. [En línea]. Disponible en: <https://coepla.zacatecas.gob.mx/wp-content/uploads/2022/03/Pinos.pdf>. Fecha de consulta: 18 de marzo de 2023.

Cruz, J. D., Crosby, M. M., Delgado, A., Alcántara, J. L., Cuca, J. M., & Tarango, L. A. (2018). Nutritional content of *Liometopum apiculatum* Mayr larvae ("escamoles") by vegetation type in north-central Mexico. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 21(4), 1239-1245. <https://doi.org/10.1016/j.aspen.2018.09.008>

Cruz, J. D., Tarango, L. A., Alcántara, J. L., Pimentel, J., Ugalde, S., Ramírez, G., & Méndez, S. J. (2014). Habitat use by the "Escamolera" ant (*Liometopum apiculatum* Mayr) in central Mexico. *Agrociencia*, 48(6), 569-582.

De-Luna, B., Macías, F. J., Esparza, G., León, E., Tarango, L. A. y Méndez, S. D. J. (2013). Recolección de insectos comestibles en Pinos Zacatecas: descripción y análisis de la actividad. *Agroproductividad*, 6(5).35-44.<https://link.gale.com/apps/doc/A382430306/IFME?u=anon~a80cbfce&sid=google-scholar&xid=09fb5745>

Eltoum, M. A., Dafalla, M. S., & Ibrahim, I. S. (2015). The Role of Ecological factors in causing land surface desertification, the case of Sudan. *Journal of Agriculture and Ecology Research International*, 4(3), 105-16.

Esparza, G., Macías, F. J., Martínez, M., Jiménez, M. A. y Méndez, S. J. (2008). Insectos comestibles asociados a las magueyerías en el ejido Tolosa, Pinos, Zacatecas, México. *Agrociencia*, 42(2), 243-252.

Figueredo, C. J., Arce, O. y Castañeda, A. (2024). Diversidad de agaves utilizados para la producción de jarabe de aguamiel en el estado de Hidalgo, México. *Polibotánica*, (58), 265-290. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.58.19>

Figueroa, B., Ugalde, S., Pineda, F. E., Ramírez, G., Figueroa, K. A. y Tarango, L. A. (2018). Producción de la hormiga escamolera (*Liometopum apiculatum* Mayr 1870) y su hábitat en el Altiplano Potosino-Zacatecano, México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 15(2), 235-245. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1870-54722018000200235&script=sci_arttext

García, M. A., Figueredo, C. J., Bucio, R. y Leonel-

Cruz, A. L. (2023a). Los Chinicuiles o gusanos rojos del maguey: Alimento de origen prehispánico amenazado por su sobreexplotación. *Biología y Sociedad*, 6(12), 41-47. <https://doi.org/10.29105/bys6.12-90>

García, A., Pedro, E., Cruz, R. y López, S. (2023b). Entomofagia: seguridad alimentaria (disponibilidad y estabilidad) en una zona rural de Oaxaca, México. *Revista Española de Nutrición Comunitaria*, 29(2), 8.

González, J. L., Pereyra, M. A. y De-León, A. (2020). Biodegradación de compuestos recalcitrantes y ftalatos por bacterias cultivables aisladas de *Liometopum apiculatum* microbiota. *World Journal Microbiology Biotechnoly*, 36, 73.

Guzmán, M. C., Carapia, J. D. C. C. y Sierra, A. V. A. (2018). Modelos de intervención en trabajo social. Una propuesta metodológica para su construcción. Catálogo General de Libros ACANITS. [En línea]. Disponible en: <https://www.acanits.org/assets/img/libros/Modelos%20TS.pdf>. Fecha de consulta: 15 de enero de 2025.

Hernández, A. M. (2021). Lepidópteros comestibles: pasado, presente y futuro. *Alimentos Ciencia E Ingeniería*, 28(2), 34-44. <https://doi.org/10.31243/aci.v28i2.1435>

Hernández, E., Tarango, L. A., Ugalde, S., Hernández, A., Cortez, C., Cruz, Y. y Morales, F. J. (2017). Hábitat y densidad de nidos de la hormiga escamolera (*Liometopum apiculatum* Mayr) en una UMA de Zacatecas, México. *Agroproductividad*, 10(5), 10-17.

INAFED, Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (2020). Gobierno del Estado de Zacatecas. [En línea]. Disponible en: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM32zacatecas/municipios/32038a.html#:~:text=Caracter%C3%ADsticas%20y%20Uso%20de%20Suelo,suelo%20aluvial%20representa%20el%2060.07>. Fecha de consulta: 18 de marzo de 2023.

Jurado, I. M. (2022). Emprendimiento rural como estrategia de desarrollo territorial: una revisión documental. *Económicas CUC*, 43(1), 257-280. <https://doi.org/10.17981/econcuc.43.1.2022.Org.7>

Lin, G. F. & Chen, L. H. (2006). Identification of homogeneous regions for regional frequency analysis using the self-organizing map. *Journal of Hydrology*, 324(1), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.09.009>

Mendoza, M. E., Morales, F. J. y Méndez, S. D. J. (2019). Tipología de productores de nopal tunero en Pinos, Zacatecas. *Revista Mexicana de Ciencias*

Agrícolas, 10(SPE22), 77-88. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i22.1860>

Miranda-Román, G., Quintero-Salazar, B., Ramos-Rostro, B. y Olguín-Arredondo, H. A. (2011). La recolección de insectos con fines alimenticios en la zona turística de Otumba y Teotihuacán, Estado de México. *PASOS. Revista de Turismo y Patrimonio Cultural*, 9(1), 81-100. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=88116214008>

Pearson, K. (1901). On lines and planes of closest fit to systems of points in space. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 2(11), 559-572. <https://doi.org/10.1080/14786440109462720>

Pedroza, A., Sánchez, I., Becerra, J. L., Ramos, E., Reyes, C., Rosales, L. V. y Vargas, G. (2014). Regionalización de zonas con escaso régimen pluvial: Estudio de caso zona Centro-Norte del estado de Durango, México. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 13(2), 71-85. <https://doi.org/10.5154/r.rchsza.2013.03.01>

Quiroz, J. G. (2021). Paradoxes of Community Development: 2018-2024 Mexico's National Development Plan. *Revista Internacional de Cooperación y Desarrollo*, 8(1), 28-38. <https://doi.org/10.21500/23825014.5206>

Rafael, J., Tarango, L. A., Ugalde, S., Lozano, E. A., Ruíz, V. M. y Bravo, A. (2017). Sustratos forrajeros y de anidación de la hormiga escamolera (*Liometopum apiculatum* Mayr, *Himenóptera: Formicidae*) en Villa González Ortega, Zacatecas, México. *Agrociencia*, 51(7), 755-769.

Ramos, J. y Pino, M. (2001). Contenido de vitaminas en algunos insectos comestibles de México. *Revista de la Sociedad Química de México*, 45(2), 66-76.

Ramos, J., Pino, J. M. y Conconi, M. (2006). Ausencia de una reglamentación y normalización de la explotación y comercialización de insectos comestibles en México. *Folia Entomológica Mexicana*, 45(3), 291-318.

Ramos-Rostro, B., Ramos-Elorduy, B. J., Pino-Moreno, J. M., Viesca-González, F. C., Martínez-Maya, J. J., Sierra-Gómez, L. del C. y Quintero-Salazar, B. (2016). Calidad sanitaria de alimentos elaborados con gusano rojo de agave (*Comadia redtembacheri* H.) en San Juan Teotihuacán, Estado de México, México. *Agrociencia*, 50(4), 391-402. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952016000400391&lng=es&tlng=es

Rentería, L., Cantú, C., Estrada, E., Marmolejo, J. y González, F. (2011). Representatividad de los tipos

de vegetación en las áreas naturales protegidas de Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(3), 69-82. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v2i3.630>

Romero, H., Tarango, L. A., Martínez, J. F. y Briones, J. A. (2024a). Monitoreo del cambio del uso de la tierra como herramienta para el manejo de recursos naturales. *Agro-Divulgación*, 4(3), 57-60.

Romero, H., Tarango, L. A., Peredo, E., Del-Rosario, J., Olmos, G., & Hernandez, E. (2024b). Productive Characteristics, Nesting Substrates, and Colonies of the Escamolera Ant (*Liometopum apiculatum* M.) in Zacatecas, Mexico. *Agro Productividad*, 17(6), 185-195. <https://doi.org/10.32854/agrop.v17i6.2933>

Senra, A. (1996). Reducción del número de poteros en vacas lecheras aplicando los principios básicos de manejo eficiente del pastizal. Ponencia XI Fórum de Ciencia y Técnica. San José. La Habana, Cuba.

Senra, A., Martínez, R., Jordán, H., Ruiz, T., Reyes, J., Guevara, R. y Ray, J. (2005). Principios básicos del pastoreo rotacional eficiente y sostenible para el subtrópico americano. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 39(1), 23-30.

Soto, A. (2021). ¿Qué es desarrollo empresarial? –Principales características. App xolot. [En línea]. Disponible en: <https://blog.appxolot.com/desarrollo-empresaria>. Fecha de consulta: 14 de enero de 2025.

Tarango, L. A. (2005). Problemática y alternativas de desarrollo de las zonas áridas y semiáridas de México. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 4(2), 17-21.

Tumbaco, G. E., Villafuerte, W. P. y Soledispa, X. E. (2022). Las cadenas de valor como estrategias de desarrollo microempresarial. *Revista Científica FIP-CAEC*, 7(1), 65-87.

Urías, C., Pérez, S., Escobedo, C. M., González, M. E., Flores, M. A., Guerrero, S. y Palacios, A. (2023). Micropropagación de *Vachellia* spp. como una alternativa para la reforestación de zonas desérticas en México. *Cultivos Tropicales*, 44(2). <https://cu-id.com/2050/v44n2e10>.

Vega, M. A., Álvarez, G. D. y Figueredo, C. J. (2023). Sistemas de manejo de agaves pulqueros en el estado de Hidalgo. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 10(20), 92-100. <https://doi.org/10.29057/ICBIV10I20.9598>

Viesca-Gonzales, F. C., Barrera-García, V. D. y Juárez-Ortega, A. J. (2012). La Recolección, Venta y Consumo de Insectos en Toluca, México y sus Alrededores. *Rosa dos Ventos*, 4(2), 208-221. <https://www.redalyc.org/pdf/4735/473547089007.pdf>



Nuevos registros de peces crípticos para el arrecife Lobos, Veracruz, México

New cryptic fish records for Lobos reef, Veracruz, Mexico

Vicencio de la Cruz-Francisco^{1*}, Vanessa Miranda Osuna-Cisneros¹, Seth Donovan Flores-Serrano¹, Jimmy Argüelles-Jiménez²

RESUMEN

Los peces crípticos son parte importante de la estructura y el funcionamiento de los arrecifes coralinos, sin embargo, su talla y gran capacidad para camuflarse dificulta su investigación. El objetivo del presente trabajo fue documentar nuevos registros de peces crípticos en el arrecife Lobos, Veracruz, México. Se realizaron 36 censos visuales errantes a través de buceo libre, distribuidos en tres sitios de la laguna arrecifal en julio del 2022. Se identificaron 5 especies de peces, de las cuales, *Starksia occidentalis* es nuevo registro para el Golfo de México, mientras que *Bathygobius mystacium*, *Ctenogobius saepepallens*, *Paraclinus nigripinnis* y *Xyrichtys splendens* son nuevas adiciones para el arrecife Lobos. Estos registros actualizan el conocimiento de la ictiofauna y reflejan la necesidad de incrementar el estudio de este grupo de peces, de los cuales, poco se conoce su función ecosistémica.

PALABRAS CLAVE: arrecifes, peces, camuflaje, bentos.

ABSTRACT

Cryptic fishes are an important part of the structure and functioning of coral reefs; however, their size and great ability to camouflage themselves makes their research difficult. The objective of the present work was to document new records of cryptic fishes in the Lobos Reef, Veracruz, Mexico. Thirty-six wandering visual censuses were conducted through free diving, distributed in three sites of the reef lagoon in July 2022. 5 fish species were identified, of which *Starksia occidentalis* is a new record for the Gulf of Mexico, while *Bathygobius mystacium*, *Ctenogobius saepepallens*, *Paraclinus nigripinnis* and *Xyrichtys splendens* are new additions for Lobos Reef. These new records update the knowledge of the ichthyofauna and reflect the need to further research into this group of fishes, of which little is known about their ecosystem function.

KEYWORDS: reefs, fish, camouflage, benthos.

*Correspondencia: viccruz@uv.mx/ Fecha de recepción: 11 de septiembre de 2024/Fecha de aceptación: 6 de mayo de 2025/Fecha de publicación: 21 de mayo de 2025.

¹Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Campus Tuxpan, carretera Tuxpan-Tampico km 7.5, col. Universitaria, Tuxpan, Veracruz, México, C. P. 92850. ²Universidad Veracruzana, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Veracruz, Veracruz, México, C. P. 91710.

INTRODUCCIÓN

Los peces crípticos son aquellos que por su tamaño pequeño y colores oscuros o moteados se camuflan con el fondo marino y suelen pasar desapercibidos por los depredadores (Depczynski y Bellwood, 2003; Rodríguez, 2008; Rodríguez-Quintal, 2010). Estos organismos pertenecen a diversas familias como Gobiidae, Gobiesocidae, Tripterygiidae, Blennidae, Labrisomidae y Chaenopsidae (Brandl y col., 2018; Robertson y col., 2023); y son un componente importante en los arrecifes coralinos, ya que son abundantes y diversos en especies (Ackerman y Bellwood, 2000). Viven asociados al fondo del arrecife, habitando ambientes dominados por algas, pastos marinos, esponjas y corales, también pueden habitar sustratos inertes, como la arena, fango y rocas coralinas (Brandl y col., 2018).

Los peces crípticos cumplen diferentes funciones, con distintos efectos, dentro de los arrecifes de coral; entre ellas, la diversidad genotípica y funcional. La pérdida de estas altera funciones esenciales, como la descomposición a través de las cascadas tróficas, lo que sugiere que la diversidad funcional críptica, sostenida por la diversidad genotípica, es crucial para mantener funciones de los ecosistemas (Raffard y col., 2020). Así, la depredación que realizan los peces crípticos hacia peces pequeños y crustáceos (Robertson y col., 2023) aporta en el flujo de energía del ecosistema. Por otro lado, se ha visto que, en las estaciones de limpieza donde participan peces crípticos se contribuye en la salud del ecosistema, al mantener saludables peces de distintos niveles tróficos (Ramírez-Ruiz y col., 2023); mientras que peces crípticos, como *Nes longus*, sostienen relaciones comensales con camarones que construyen túneles (Humann y Deloach, 2014) que oxigenan el fondo marino. Sin embargo, debido a su tamaño pequeño y coloración particular, los peces crípticos son registrados solo ocasionalmente en los censos visuales, lo que genera que estén pobremente representados en los listados taxonómicos (Depczynski y Bellwood, 2003; Rodríguez, 2008; Rodríguez-Quintal, 2010).

En diversos arrecifes del estado de Veracruz, México, se han registrado peces crípticos, tal y como ha sucedido con el arrecife Lobos, donde las primeras contribuciones que abordan su diversidad fueron los estudios de Castro-Aguirre y Márquez-Espinoza (1981), quienes, a través del uso de sustancias químicas, como la rotenona, lograron coleccionar especies de diversas familias. Posteriormente, González-Gándara (2003), por medio de censos visuales, incrementó el conocimiento a través de un listado taxonómico en el que incluyó más especies crípticas para el arrecife Lobos y cinco arrecifes adyacentes, que ahora forman el Área de Protección de Flora y Fauna “Sistema Arrecifal Lobos-Tuxpan” (SALT). En la segunda década del siglo XXI se realizaron nuevas adiciones de peces crípticos para el arrecife Lobos y arrecifes adyacentes, producto de censos visuales, complementados con colectas manuales a través del uso de aceite de clavo y redes de mano para la colecta de peces crípticos (González-Gándara y col., 2013; 2015), los cuales se encuentran depositados en la colección científica de peces con las siglas VER-PEC (González-Gándara y col., 2016). Estos esfuerzos por estudiar la ictiofauna también se extendieron a los arrecifes sumergidos adyacentes al SALT (González-Gándara, 2014; Cortés-Useche y col., 2015; Ortiz-Lozano y col., 2021), donde se adicionaron nuevos registros de peces, siendo el reporte más reciente el del pez ardilla *Sargocentron coroscum* (Poey, 1860) (De-la-Cruz-Francisco y col., 2023).

En el arrecife Lobos se han documentado 29 especies de peces crípticos pertenecientes a las familias Gobiidae, Gobiesocidae, Tripterygiidae, Blennidae, Labrisomidae y Chaenopsidae, lo cual ha sido producto de compilaciones, observaciones y colectas realizadas por González-Gándara (2003), González-Gándara y col. (2013; 2015) y Argüelles-Jiménez y Gutiérrez-Velázquez (2025).

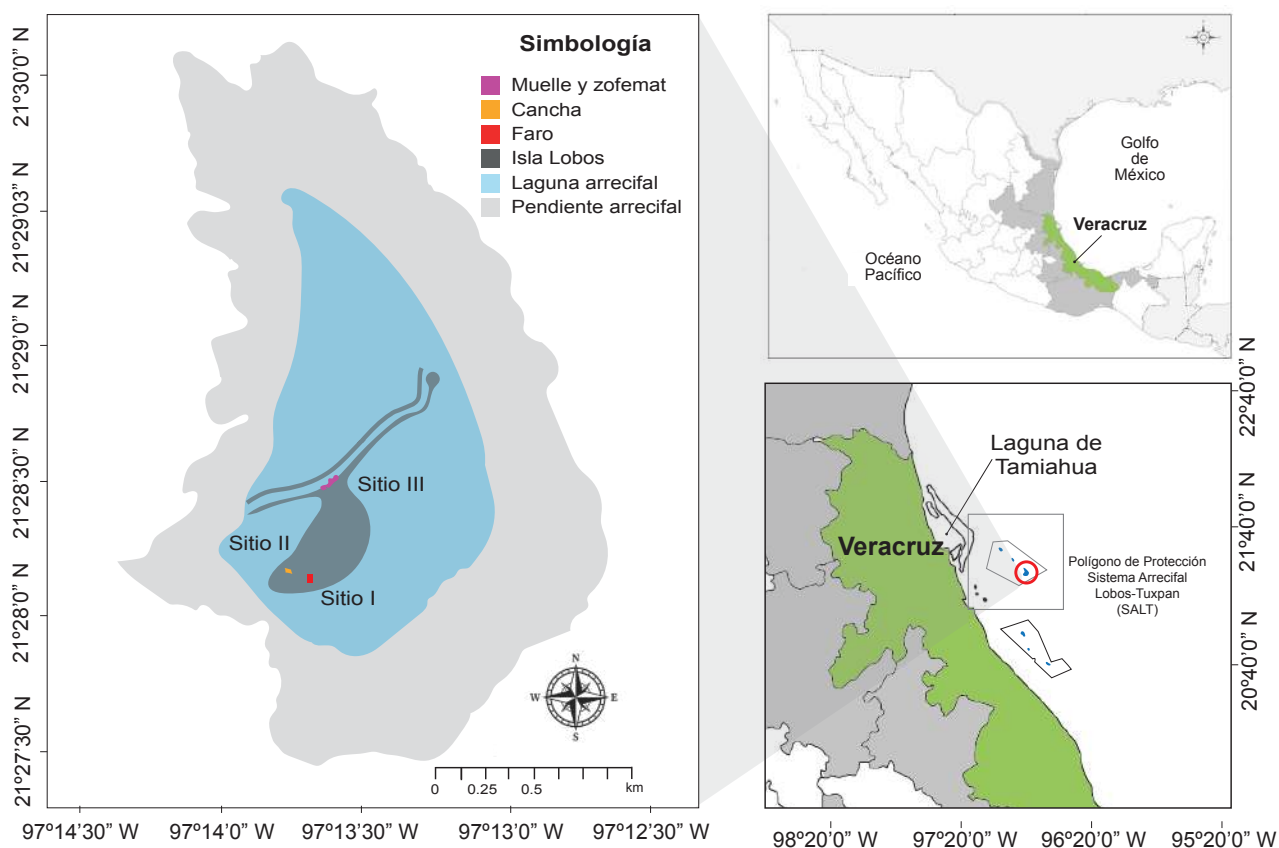
El objetivo del presente trabajo fue ampliar el conocimiento de la riqueza de especies de los peces crípticos en el arrecife Lobos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en la laguna del arrecife Lobos, el cual se ubica entre las coordenadas 97°13'30.30" W y 21°28'27.95" N (Figura 1). Este arrecife es de tipo plataforma, presenta un cayo arenoso que forma la Isla Lobos, la cual se sitúa cerca del extremo sur del arrecife y se eleva 2 msnm de la superficie. También, cuenta con un canal de navegación que atraviesa la isla, lo que facilita la navegación de embarcaciones menores. La laguna arrecifal es somera, de aproximadamente 1 m de profundidad; presenta praderas de pasto marino *Thalassia testudinum* K.D. Koenig; en la misma zona proliferan macroalgas, algas filamentosas y colonias dispersas de corales masivos rodeados de pequeños arenales. Además existen áreas de roca coralina, escombros y arenales (Chávez y col., 1970).

Los lugares explorados fueron: Sitio I, ubicado al suroeste de la laguna arrecifal, caracte-

terizado por un sustrato de rocas coralinas con tapetes algales, parches de arena con macroalgas psamófilas y colonias dispersas del coral cerebro nudoso (*Pseudodiploria clivosa*) (Ellis y Solander, 1786), coral cerebro (*Pseudodiploria strigosa*) (Dana, 1846), coral de estrellas rocoso (*Orbicella annularis*) (Ellis y Solander, 1786) y coral estrella menor (*Siderastrea radians*) (Pallas, 1766). Sitio II, ubicado al oeste de la laguna arrecifal, es una bahía somera, el sustrato que ahora predomina es arenoso con algas psamófilas (*Caulerpa* spp) y algas calcáreas articuladas (*Halimeda* spp); anteriormente, los pastos marinos presentaban una mayor talla (30.8 ± 9.1) y cobertura (63.7 ± 20.3) (González-Gándara y col., 2006) y constituía la zona de alimentación de la tortuga verde: *Chelonia mydas* (Linnaeus, 1758). Sitio III, ubicado al este de la laguna arrecifal, cerca de las inmediaciones del chalán hundido, el sustrato inerte es arenoso con escombros de restos coralinos, se caracteriza por presentar pastos marinos de menos de



■ Figura 1. Localización geográfica del arrecife Lobos, Veracruz, México.

Figure 1. Geographical location of the Lobos reef, Veracruz, Mexico.

10 cm de altura, colonias dispersas de *P. clivosa* y esponjas masivas como *Cliona varians* (Duchassaing y Michelotti, 1864).

En cada sitio de muestreo se realizaron 12 censos visuales (30 min cada uno) durante el periodo de julio de 2022, utilizando la técnica de buzo errante, enfocados a la búsqueda de peces crípticos en los componentes de cada sitio (arena, escombros, pastos marinos y macroalgas). Se tomaron evidencias fotográficas de los peces observados utilizando una cámara compacta sumergible TG6 (Olympus, Tokyo, Japón) con resolución de 12 megapíxeles. La identificación de las especies de peces se llevó a cabo mediante características de la coloración y morfología externa del cuerpo. Con el material fotográfico obtenido se validó la identificación de las especies utilizando guías de identificación de peces del Caribe (Lieske y Myers, 1998; Humann y Deloach, 2014), además se consultó la guía virtual de peces: Gran Caribe (Robertson y col., 2023) y se revisó bibliografía especializada (Greenfield, 1979; Tornabene y col., 2010). Los nuevos registros se describen con los siguientes datos: material examinado, descripción de la morfología, hábitat, distribución global y comentarios. El arreglo taxonómico para las categorías superiores (clase, orden y familia) sigue al criterio de Van-der-Laan y col. (2024).

RESULTADOS

Se identificaron cinco especies de peces en la laguna del arrecife Lobos (Tabla 1). Una es nuevo registro para el Golfo de México y cuatro los son para el SALT. Las 2 especies pertenecientes a la familia Gobiidae y las 2 especies de la familia Labrisomidae son totalmente crípticas, en tanto que, *X. splendens*, perteneciente a la familia Labridae es demersal con comportamiento críptico.

Caracterización taxonómica

Clase: Actinopteri Cope, 1871.

Orden: Gobiiformes Günther, 1880.

Familia: Gobiidae Cuvier, 1816.

Género: *Bathygobius* Bleeker, 1878.

Especie: *Bathygobius mystacium* Ginsburg, 1947.

Material examinado. Un individuo de aproximadamente 3 cm de longitud total, observado en el sitio III de la laguna arrecifal (97°13'23.93" W, 21°28'13.72" N) el 27 de julio de 2022.

Descripción. Cuerpo alargado, grisáceo a marrón, con boca pequeña y ojos grandes. Aleta dorsal translúcida. Dorso con tres barras marrones de ancho variable que se extienden hasta la línea lateral y con una fila de manchas irregulares en la zona ventral (Figuras 2a y 2b).

Hábitat. El ejemplar fue observado sobre escombros de roca coralina con arena a 1 m de profundidad.

Distribución global. Brasil, Florida, Estados Unidos, Caribe, Golfo de México (Humann y Deloach, 2014) y el Sistema Arrecifal Veracruzano (SAV) (Robertson y col., 2019). Nuevo registro para el arrecife Lobos.

Comentarios. La coloración de *Bathygobius mystacium* es similar a otra especie de la región del Golfo de México: *B. soporator* (Valenciennes, 1837), pero esta especie presenta tres barras dorsales oscuras que se dividen hacia la parte baja, así como manchas oscuras a los costados (Tornabene y col., 2010).

Caracterización taxonómica

Clase: Actinopteri Cope, 1871.

Orden: Gobiiformes Günther, 1880.

Familia: Gobiidae Cuvier, 1816.

Género: *Ctenogobius* Gill, 1858.

Especie: *Ctenogobius saepepallens* (Gilbert y Randall, 1968).

Material examinado. 18 individuos de 3 cm a 5 cm de longitud total observados en el sitio II de la laguna arrecifal (97°13'43.59" W, 21°28'11.62" N), el 30 de julio de 2022.

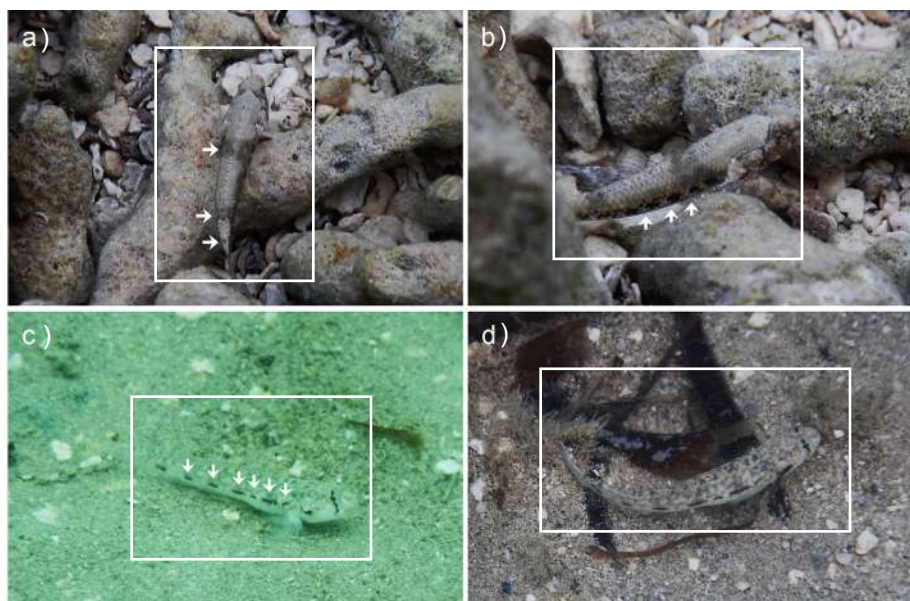
Descripción. Cuerpo alargado y moteado en el dorso, la coloración distintiva consiste en una barra vertical negra que atraviesa el ojo y se extiende a la mandíbula, con una mancha triangular o irregular oscura sobre el opérculo.

■ Tabla 1. Listado de peces crípticos y con comportamiento críptico registrados en el arrecife Lobos, Veracruz, México.

Table 1. List of cryptic and cryptically behaving fishes recorded at Lobos Reef, Veracruz, Mexico.

Especie	González-Gándara (2003)	González-Gándara y col. (2006); Taylor y Akins (2007); González-Gándara y col. (2013; 2015)	Presente estudio
Familia Blennidae			
<i>Entomacrodus nigricans</i> Gill, 1859		1	
<i>Hypleurochilus bermudensis</i> Beebe & Tee-Van, 1933	1	1	
<i>Ophioblennius macclurei</i> (Silvester, 1915)	1	1	
<i>Parablennius marmoreus</i> (Poey, 1876)	1	1	
<i>Scartella cristata</i> (Linnaeus, 1758)	1	1	
Familia Chaenopsidae			
<i>Emblemariopsis bahamensis</i> Stephens, 1961	1	1	
Familia Gobiesocidae			
<i>Gobiesox strumosus</i> Cope, 1870	1	1	
Familia Gobiidae			
<i>Bathygobius curacao</i> (Metzelaar, 1919)	1	1	
<i>Bathygobius mystacium</i> Ginsburg, 1947			1
<i>Bathygobius soporator</i> (Valenciennes, 1837)	1	1	
<i>Coryphopterus dicrus</i> Böhlke & Robins, 1960	1	1	
<i>Coryphopterus glaucofraenum</i> Gill, 1863	1	1	
<i>Coryphopterus hyalinus</i> Böhlke & Robins, 1962	1	1	
<i>Coryphopterus punctipectophorus</i> Springer, 1960		1	
<i>Ctenogobius saepepallens</i> (Gilbert & Randall, 1968)			1
<i>Elacatinus jarocho</i> Taylor & Akins, 2007		1	
<i>Elacatinus oceanops</i> Jordan, 1904	1	1	
<i>Gnatholepis thompsoni</i> Jordan, 1904	1	1	
<i>Tigriogobius dilepis</i> (Robins & Böhlke, 1964)		1	
<i>Tigriogobius macrodon</i> (Beebe & Tee-Van, 1928)	1	1	
<i>Tigriogobius redimiculus</i> (Taylor & Akins, 2007)		1	
<i>Lythrypnus nesiotes</i> Böhlke & Robins, 1960	1	1	
<i>Lythrypnus phorellus</i> Böhlke & Robins, 1960	1	1	
<i>Lythrypnus spilus</i> Böhlke & Robins, 1960	1	1	
<i>Priolepis hipoliti</i> (Metzelaar, 1922)	1	1	
Familia Labrisomidae			
<i>Gobioclinus gobio</i> (Valenciennes, 1836)	1	1	
<i>Labrisomus nuchipinnis</i> (Quoy & Gaimard, 1824)	1	1	
<i>Malacoctenus triangulatus</i> Springer, 1959	1	1	
<i>Paraclinus nigripinnis</i> (Steindachner, 1867)			1
<i>Starksia occidentalis</i> Greenfield, 1979			1
<i>Starksia ocellata</i> (Steindachner, 1876)	1	1	
Familia Labridae			
<i>Xyrichtys splendens</i> Castelnau, 1855*			1
Familia Tripterygiidae			
<i>Enneanectes boehlkei</i> Rosenblatt, 1960	1	1	
<i>Enneanectes jordani</i> (Evermann & Marsh, 1899)	1	1	

*Comportamiento críptico.



■ Figura 2. Nuevos registros de peces arrecifales. Figuras 2a y 2b. *Bathygobius mystacium*. Figuras 2c y 2d. *Ctenogobius saepepallens*.

Figure 2. New records of reef fish. Figures 2a and 2b. *Bathygobius mystacium*. Figures 2c and 2d. *Ctenogobius saepepallens*.

A los costados del cuerpo presenta una fila de seis rayas negras horizontales y una mancha al final de la base del caudal (Figuras 2c y 2d).

Hábitat. La especie fue observada sobre sustrato arenoso con escombros de roca coralina y pastos marinos a 1 m de profundidad.

Distribución global. Brasil, Florida, Estados Unidos, Caribe (Humann y Deloach, 2014) y el SAV (Robertson y col., 2023). Nuevo registro para el arrecife Lobos.

Comentarios. *C. saepepallens* es una especie criptobentónica, y en la región del atlántico occidental hay varias especies similares en la coloración del cuerpo, por ejemplo, *Ctenogobius claytonii* (Meek, 1902), *Gnatholepis thompsoni* Jordan, 1904 y *B. soporator*. *C. claytonii* carece de una mancha negra en el opérculo, además, a lo lados del cuerpo en vez de filas horizontales presenta cinco barras oscuras; *G. thompsoni* tiene un color blanquecino amarillento y carece de las líneas horizontales a los costados del cuerpo, mientras que,

B. soporator presenta un color grisáceo con tres barras de color marrón en el dorso, las cuales se dividen y se extienden hacia la región ventral. *C. saepepallens* se reporta desde ambientes someros hasta los 20 m de profundidad (Humann y Deloach, 2014; Robertson y col., 2023).

Caracterización taxonómica

Clase: Actinopteri Cope, 1871.

Orden: Blenniiformes Bleeker, 1860

Familia: Labrisomidae Clark Hubbs, 1952

Género: *Paraclinus* Mocquard, 1888

Especie: *Paraclinus nigripinnis* (Steindachner, 1867).

Material examinado. Un individuo de 3 cm de longitud total observado en el sitio III de la laguna arrecifal (97°13'25.27" W, 21°28'11.11" N) el 27 de julio 2022.

Descripción. Cuerpo alargado de coloración marrón oscuro con tonalidades blanquecinas, nuca de color blanco y cirros pálidos; presenta barras oscuras a los lados del cuerpo, la aleta dorsal también tiene barras oscuras y un

ocelo negro con el centro azul. Por igual, la aleta anal presenta barras oscuras (Figuras 3a y 3b).

Hábitat. Esta especie se observó sobre escombros de roca coralina, con arena y pastos marinos (*T. testudinum*) a 1 m de profundidad.

Distribución global. Florida, Estados Unidos, hasta el sur del Caribe (Robertson y col., 2023) y SAV (GBIF, 2025). Nuevo registro para el arrecife Lobos.

Caracterización taxonómica

Clase: Actinopteri Cope, 1871.

Orden: Blenniiformes Bleeker, 1860

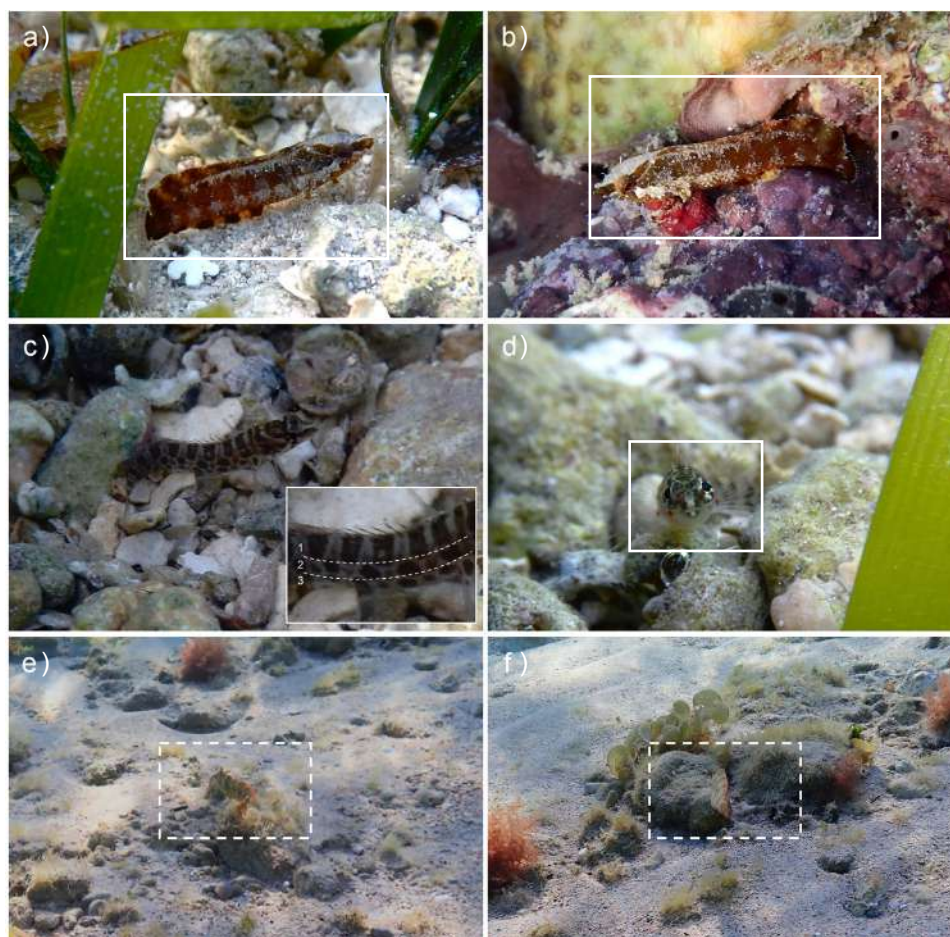
Familia: Labrisomidae Clark Hubbs, 1952

Género: *Starksia* Jordan y Evermann, 1896.

Especie: *Starksia occidentalis* Greenfield, 1979

Material examinado. Un individuo de 2 cm de longitud total observado en el sitio III de la laguna arrecifal (97°13'27.82" W, 21°28'6.25" N) el 27 de julio de 2022.

Descripción. Cuerpo alargado, cabeza pequeña y hocico corto, presenta cirros en la nuca en posición nasal y orbital. La coloración distintiva consiste en una barra horizontal pálida detrás del ojo en forma de Y; en el dorso resaltan tres filas de manchas irregulares marrones oscuras que contrastan con un color marrón pálido del cuerpo (Figuras 3c y 3d).



■ Figura 3. Nuevos registros de peces arrecifales. Figuras 3a y 3b. *Paraclinus nigripinnis*. Figuras 3c y 3d. *Starksia occidentalis*. Figuras 3e y 3f. *Xyrichtys splendens*.

Figure 3. New records of reef fish. Figures 3a and 3b. *Paraclinus nigripinnis*. Figures 3c and 3d. *Starksia occidentalis*. Figures 3e and 3f. *Xyrichtys splendens*.

Hábitat. Esta especie se observó sobre escombros de roca coralina, con arena y pastos marinos (*T. testudinum*) a 1 m de profundidad.

Distribución global. Se distribuye en el Caribe (Greenfield, 1979). Primer registro para el Golfo de México.

Comentarios. El género *Starksia* es muy diverso en el atlántico occidental con 28 especies válidas (Williams y Mounts, 2003; Baldwin y col., 2011), sin embargo, para el Golfo de México, solamente se tiene conocimiento del registro de *Starksia ocellata* (Steindachner, 1876) para el SAV (Robertson y col., 2019) y SALT (González-Gándara y col., 2015). Ahora con el registro de *S. occidentalis*, que aporta este trabajo, el género *Starksia* está representado por dos especies en el Golfo de México. *S. ocellata* se diferencia del presente nuevo registro (*S. occidentalis*) por carecer de manchas verticales en los labios y de una barra horizontal en forma de Y (Greenfield, 1979).

Caracterización taxonómica

Clase: Actinopteri Cope, 1871.

Orden: Labriformes Kaufman y Liem, 1982.

Familia: Labridae Cuvier, 1816.

Género: *Xyrichtys* Cuvier, 1814.

Especie: *Xyrichtys splendens* Castelnau, 1855.

Material examinado. Un individuo de 7 cm de longitud total observado en el sitio I de la laguna arrecifal (97°13'42.10" W, 21°28'2.79" N), el 26 de julio de 2022.

Descripción. Individuo de fase intermedia, de cuerpo alargado y comprimido lateralmente, aleta dorsal continua con las dos primeras espinas altas, aleta caudal ligeramente redondeada y aleta anal amplia. La coloración distintiva consiste en barras verticales de color marrón verdoso a los costados y con una mancha negra a la mitad de su cuerpo. Los bordes de las aletas dorsal, anal y caudal de color naranja, el resto del cuerpo es de color amarillo (Figuras 3e y 3f).

Hábitat. Esta especie se observó sobre sustrato arenoso con rocas coralinas cubierto de

macroalgas del género *Padina*, al suroeste de la laguna arrecifal, a una profundidad de 1 m.

Distribución global. Brasil, Caribe, Florida, Estados Unidos (Lieske y Myers, 1998; Humann y Deloach, 2014) y SAV (Del-Moral-Flores y col., 2013; Robertson y col., 2023). Nuevo registro para el arrecife Lobos.

Comentarios. Es de hábitos escurridizos y por su coloración pasa desapercibido entre los pastos marinos y macroalgas, habita en zonas arenosas con pastos marinos de áreas someras y profundas de hasta 15 m (Robertson y col., 2023).

DISCUSIÓN

El escaso nivel de conocimiento de la diversidad y distribución de los peces crípticos se origina por el reducido número de estudios enfocados a este grupo de peces (Brandl y col., 2018). Es por ello que, las técnicas invasivas (rotenona, trampas, redes) y no invasivas (censos), enfocadas a los peces crípticos, han sido esenciales para incrementar el conocimiento de su diversidad, así como dilucidar su papel funcional. Anteriormente, se utilizaron métodos invasivos como rotenona en el arrecife Lobos, lo que permitió obtener los primeros registros de peces crípticos (Castro-Aguirre y Márquez-Espinoza, 1981), sin embargo, esta técnica de colecta ya no está permitida, dado que el arrecife Lobos forma parte de un área natural protegida.

El censo errante es un método no invasivo que se considera con limitaciones para el registro de peces crípticos (Depczynski y Bellwood, 2003; Rodríguez-Quintal, 2010; Brandl y col., 2018). Sin embargo, permite una búsqueda cautelosa, lo que evita la reacción de los peces, que tienden a escapar y ocultarse rápidamente ante movimientos bruscos. Se debe desarrollar, de manera minuciosa, para distinguir este grupo de peces del sustrato, ya que generalmente pasan desapercibidos por el observador. Además, no se requieren permisos de captura, por lo que es fácil y rápido su empleo. En este estudio, se utilizó dicho

método y permitió registrar 5 nuevos registros de peces en el arrecife Lobos, pertenecientes a las familias Gobiidae, Labrisomidae y Labridae, las cuales presentaban una riqueza de 16, 4 y 12 especies (González-Gándara y col. 2003; González-Gándara y col., 2013; 2015), por lo que, la riqueza asciende a 18, 6 y 13 especies para cada familia, respectivamente. Cabe destacar que, de estos nuevos registros, *X. splendens* es principalmente demersal, al igual que las otras especies Labridae reportadas en la zona (Tabla 2). Sin embargo, se decidió incluirlo en este estudio, debido a su comportamiento críptico, ya que se oculta en fondos rocosos, arenosos y entre las algas, y su forma y coloración dificultan su observación a primera vista, porque puede permanecer escondido por varios minutos (Hummann y Deloach, 2014).

Los nuevos registros encontrados prueban la eficacia de los censos errantes, que pueden ser usados como complemento en las técnicas tradicionales de muestreo no invasivas enfocadas a los peces, como la de transecto en banda y censos estacionarios, las cuales

han sido los principales métodos de muestreo y que han generado la mayor parte del conocimiento de la ictiofauna del arrecife Lobos y del SALT (González-Gándara y González-Sansón, 1997; González-Gándara, 2003; González-Gándara y col., 2006; 2012; 2013; 2015).

Las cinco especies identificadas se han reportado como micro carnívoras, alimentándose principalmente de crustáceos móviles bentónicos, así como gusanos poliquetos, solo *X. splendens* agrega a su dieta moluscos y zooplancton (Robertson y col., 2023). Dicha información propone que estas especies ingresan energía al sistema a través de la depredación, la cual es importante en los controles del flujo de la energía en los ecosistemas coralinos (Argüelles-Jiménez y col., 2020; 2021b). Además, se ha descrito que algunas especies de peces crípticos, como *Helcogrammoides cunninghami* (Smit, 1898), cambian su dieta conforme la disponibilidad del alimento, pasando de bivalvos a anfípodos y decápodos (Winkler y col., 2017). En cambio, otros peces crípticos endémicos de Veracruz (*Elacatinus jarocho* Taylor y Akins, 2007) solo

■ **Tabla 2. Listado de peces demersales y con comportamiento críptico de la familia Labridae registrados en el arrecife Lobos, Veracruz, México.**

Table 2. List of demersal and cryptic Labridae fishes recorded at Lobos Reef, Veracruz, Mexico.

Especie	González-Gándara (2003)	González-Gándara y col. (2006); Taylor y Akins (2007); González-Gándara y col. (2013; 2015)	Presente estudio
Familia Labridae			
<i>Bodianus pulchellus</i> (Poey, 1860)		1	
<i>Bodianus rufus</i> Linnaeus, 1758	1	1	
<i>Clepticus parrae</i> (Bloch & Schneider, 1801)	1	1	
<i>Halichoeres bivittatus</i> (Bloch, 1791)	1	1	
<i>Halichoeres burekae</i> (Weaver & Rocha, 2007)	1	1	
<i>Halichoeres garnoti</i> (Valenciennes, 1839)		1	
<i>Halichoeres maculipinna</i> (Müller & Troschel, 1848)		1	
<i>Halichoeres poeyi</i> (Steindachner, 1867)		1	
<i>Halichoeres radiatus</i> Linnaeus, 1758	1	1	
<i>Lachnolaimus maximus</i> (Walbaum, 1792)	1	1	
<i>Thalassoma bifasciatum</i> (Bloch, 1791)	1	1	
<i>Xyrichtys martinicensis</i> Valenciennes, 1840)	1	1	
<i>Xyrichtys splendens</i> Castelnau, 1855*			1

*Comportamiento críptico.

se alimentan de fitoplancton (Robertson y col., 2023). Dicha información indica que los peces crípticos pueden ser carnívoros generalistas, carnívoros especializados y en algunos casos pueden optar por cambio de dieta conforme el alimento esté disponible, sin embargo, la llegada de peces crípticos no nativos al suroeste del Golfo de México, como *Protemblemaria punctata* Cervigon, 1966 (Argüelles-Jiménez y col., 2021a), la cual se alimenta tanto de plancton como de los componentes tróficos que consumen las cinco especies registradas, podría ocasionar disturbios ecosistémicos. Aunque *P. punctata* no ha sido registrada fuera del centro de Veracruz, es importante considerar el monitoreo de este grupo de peces del que aún se desconocen aspectos sobre su dieta, abundancia, densidad, distribución (Depczynski y Bellwood, 2003; Brandl y col., 2018) y las estaciones de limpieza donde ayudan a mejorar la salud del ecosistema (Ramírez-Ruiz y col., 2023).

Las lagunas de conocimiento de este grupo de peces pobremente estudiados (Depczynski y Bellwood, 2003) se puede ver en distintos sistemas arrecifales como en el SALT. Los últimos estudios de la ictiofauna del arrecife Lobos han sido principalmente a través de listados taxonómicos. González-Gándara (2003) reportó 24 especies crípticas pertenecientes a las familias de Tripterygiidae, Labrisomidae, Chaenopsidae, Blenniidae, Gobiesocidae, Gobiidae y Labridae. Más tarde, Taylor y Akins (2007) documentaron 2 especies más de la familia Gobiidae: *Elacatinus jarocho* y *Tigri-gobius redimiculus*. Posteriormente, González-Gándara y col. (2013) reportaron la misma composición de especies y adicionaron 1 registro para la familia Blenniidae: *Entomacrodus nigricans* Gill, 1859, y 2 registros más para Gobiidae: *Coryphopterus puntipectophorus* Springer, 1960 y *Trigrigobius dilepis* (Robins & Böhlke, 1964). Esta riqueza de 29 especies se mantuvo constante en el informe de González-Gándara y col. (2015). Con los nuevos registros que aporta el presente trabajo, el conocimiento sobre los peces totalmente crípticos en el arrecife Lobos se incrementa a

33 especies y a 13 especies demersales con comportamiento críptico (Tabla 1).

Por otra parte, en la última investigación donde se evaluó el ensamble comunitario de los peces en el arrecife Lobos, realizado hace dos décadas, no mencionaron en sus resultados a los peces crípticos (González-Gándara y col., 2006). Por ello, es necesario implementar nuevos estudios orientados a evaluar los ensambles comunitarios de los peces (en el día y la noche), en especial de las especies crípticas, lo cual elevaría la riqueza de especies, por lo que se tendrían listados taxonómicos más completos que ayudarían a profundizar en el conocimiento de la estructura y función de la ictiofauna críptica, información que resultaría relevante y útil para las estrategias de manejo y protección, ante la presencia del pez león (que ha sido observado por los autores en la laguna arrecifal), el cual representa una amenaza a la ictiofauna nativa del arrecife Lobos y del SALT, por ejemplo, para las especies de *Ha-lichthys burekai* Weaver y Rocha, 2007, *T. redimiculus* y *E. jarocho*, las cuales se han encontrado en el contenido estomacal del pez león (González-Gándara y col., 2020).

Estudios realizados en el SALT han documentado que, dentro de las presas que consume el pez león se encuentran distintas familias de peces crípticos, por ejemplo, Gobiidae, Blenniidae y Labrisomidae (González-Gándara y col., 2020; González-Gándara, 2023), familias a las que pertenecen los nuevos registros que aporta este estudio.

Por lo tanto, resulta necesario aplicar planes de manejo y control de las poblaciones del pez león, principalmente en las pendientes de sotavento y barlovento, lugares donde se encuentran peces crípticos endémicos y potenciales presas del pez león exótico invasor del género *Pterois* (González-Gándara, 2023).

En este estudio se destaca el registro de *S. occidentalis* que, aunado a las contribuciones de Robertson y col. (2019), Rivera-Hi-

gueras y Pérez-España (2022) y Argüelles-Jiménez y col. (2021a), incrementan el conocimiento de la fauna críptica de los arrecifes de Veracruz. Ante la amenaza que representan las especies no nativas como el pez león (depredación) y *P. punctata* (competencia por espacio y alimento) en las especies crípticas nativas, estas contribuciones son valiosas, ya que incrementan el conocimiento de su riqueza íctica a escala local y actualizan el conocimiento de la ictiofauna a nivel del suroeste del Golfo de México (Argüelles-Jiménez y Gutiérrez-Velázquez, 2025), información que puede ser de utilidad para la implementación de medidas de manejo y protección más eficaces a fin de salvaguardar las especies crípticas marinas.

CONCLUSIONES

Los cinco nuevos registros de peces crípticos documentados en el presente trabajo, *Bathygobius mystacium*, *Ctenogobius saepepallens*, *Paraclinus nigripinnis*, y *Xyrichtys splendens*, para el arrecife Lobos, Veracruz, y *S. occidentalis* para el Golfo de México, reflejan la necesidad de incrementar la investigación en el área de este grupo de peces cuya función ecosistémica poco se conoce. Dicha información ayudaría a enfocar las acciones de manejo y conservación, las cuales son imprescindibles en estos ecosistemas marinos para salvaguardar la biodiversidad.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declararon no tener conflictos de intereses de ningún tipo.

REFERENCIAS

- Ackerman, J. L. & Bellwood, D. R. (2000). Reef fish assemblages: a re-evaluation using enclosed rotenone stations. *Marine Ecology Progress Series*, 206, 227-237. <https://doi.org/10.3354/meps206227>
- Argüelles-Jiménez, J. y Gutiérrez-Velázquez, A. L. (2025). Peces del Corredor Arrecifal del Suroeste del Golfo de México. En A. Granados-Barba, L. D. Ortiz-Lozano y A. L. Gutiérrez-Velázquez (Eds.), *Nuevo Conocimiento Científico sobre el Corredor Arrecifal del Suroeste del Golfo de México: integrando los ambientes costeros* (pp. 87-134). Universidad Autónoma de Campeche.
- Argüelles-Jiménez, J., Alva-Basurto, J. C., Pérez-España, H., Zetina-Rejón, M. J., & Arias-González J. E. (2020). The measurement of ecosystem development in Caribbean coral reefs through topological indices. *Ecological Indicators*, 110:105866. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105866>
- Argüelles-Jiménez, J., Contreras-Juárez, M., & Pérez, E. P. (2021a). Potential invasion of the Gulf of Mexico by *Protemblemaria punctata* (Teleostei: Chaenopsidae), a cryptobenthic fish endemic to Venezuela. *Bulletin of Marine Science*, 97(3), 373-380.
- Argüelles-Jiménez, J., Rodríguez-Zagaroza, F. A., C. González-Gándara, Alba-Basurto, J. C., Arias-González, J. E., Hernández-Landa, R., Aguilar-Pérrera, A., Okolodkov, Y. B., Gutiérrez-Velázquez, A. L., Zetina-Rejón, M. J., Ulanowicz, R., & Pérez-España, H. (2021b). Functional development states of the Greater Caribbean coral reefs. *Ecological Indicators*, 121:107170. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107170>
- Baldwin, C. C., Castillo, C. I., Weigt, L. A., & Victor, B. C. (2011). Seven new species within western Atlantic *Starksia atlantica*, *S. lepicoelia*, and *S. shuiteri* (Teleostei, Labrisomidae), with comments on congruence of DNA barcodes and species. *Zoo Keys*, 79, 21-72.
- Brandl, S. J., Goatley, C. H. R., Bellwood, D. R., & Tornabene, L. (2018). The hidden half: ecology and evolution of cryptobenthic fishes on coral reefs. *Biological reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 93(4), 1846-1873. <https://doi.org/10.1111/brv.12423>
- Castro-Aguirre, J. L. y Márquez-Espinoza, A. (1981). Contribución al conocimiento de la ictiofauna de la Isla Lobos y zonas adyacentes, Veracruz, México. Dirección General Instituto Nacional de la Pesca. *Serie Científica*, 22, 1-85.
- Chávez, E., Hidalgo, E. y Sevilla, M. (1970). Datos acerca de las comunidades bentónicas del arrecife Lobos, Veracruz. *Sociedad Mexicana de Historia Natural*, 31, 211-281.
- Cortés-Useche, C., Calle-Treviño, J. y Martos-Fernández, F. J. (2015). Lista de peces de los arrecifes Oro Verde, Pantepec y Blake, Veracruz, Mé-

xico. *Revista de Investigaciones Marinas*, 35(1), 112-118.

De-la-Cruz-Francisco, V., Osuna-Cisneros, V. M., Flores-Serrano, S. D. y Argüelles-Jiménez, J. (2023). Primer registro de *Sargocentron coruscum* (Holocentridae) en el suroeste del golfo de México. *Novitates Caribaea*, 21, 69-75.

Del-Moral-Flores, L. F., Tello-Musi, J. L., Reyes-Bonilla, H., Pérez-España, H., Martínez-Pérez, J. A., Horta-Puga, G., Velazco-Mendoza, L. A. y Álvarez-del-Castillo-Cárdenas, P. A. (2013). Lista sistemática y afinidades zoogeográficas de la ictiofauna del sistema arrecifal veracruzano, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 84, 825-846.

Depczynski, M. & Bellwood, D. R. (2003). The role of cryptobenthic reef fishes in coral reef trophodynamics. *Marine Ecology Progress Series*, 256, 183-191.

GBIF.org, Global Biodiversity Information Facility (2025) GBIF Occurrence Download. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.15468/dl.47vx9s>. Fecha de consulta: 10 de marzo de 2025.

González-Gándara, C. (2003). Ictiofauna de los arrecifes coralinos del norte de Veracruz. Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México. *Serie Zoológica*, 74(2), 163-177.

González-Gándara, C. (2014). Peces del arrecife Blake, Veracruz, México: inventario, distribución y afinidades zoogeográficas. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 2(4), 87-97.

González-Gándara, C. (2023). Densidad, biomasa y estructura de las tallas del pez león en el arrecife Tuxpan, Veracruz. *Hidrobiológica*, 33 (2): 105-114.

González-Gándara, C., Abarca-Arenas, L. G., De-la-Cruz-Francisco, V., Argüelles-Jiménez, J. y Salas-Pérez, J. J. (2016). Colección de peces de la Universidad Veracruzana. En L. F. Del-Moral-Flores, A. J. Ramírez-Villalobos, J. A. Martínez-Pérez, A. F. González-Acosta y J. Franco-López (Eds.) *Colecciones Ictiológicas de Latinoamérica* (pp. 210-208). Universidad Nacional Autónoma de México.

González-Gándara, C., De-la-Cruz-Francisco, V. Salas-Pérez, J. y Domínguez-Barradas, C. (2012). Lista de los peces de Tuxpan, Veracruz, México. *Revista Científica UDO Agrícola*, 12(3), 675-689.

González-Gándara, C., Domínguez-Barradas, C., De-la-Cruz-Francisco, V., Solís-Marín, F. A. y Carriart-Ganivet, J. P. (2015). Esponjas, corales escleractinios, equinodermos y peces de arrecifes

coralinos del norte y sur de Veracruz. Universidad Veracruzana. Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Informe final SNIB-CONABIO, proyecto No. JF124. México D.F. [En línea]. Disponible en: <http://www.conabio.gob.mx/institucion/proyectos/resultados/InfJF124.pdf>. Fecha de consulta: 15 de mayo de 2024.

González-Gándara, C., Escarcega-Quiroga, P. A., & Flores-Serrano, S. D. (2020). Feeding ecology of Pterois volitans on the coral reefs of northern Veracruz, Mexico. *Oceanography & Fisheries Open Access*, 12(2), 1-2. <https://doi.org/10.19080/OFOAJ.2020.12.555834>

González-Gándara, C. y González-Sansón, G. (1997). Composición y abundancia de la ictiofauna del arrecife Tuxpan, Veracruz, México. *Revista de Investigaciones Marinas*, 18(3), 249-259.

González-Gándara, C., Lozano-Vilano, M., De-la-Cruz-Francisco, V. y Domínguez-Barradas, C. (2013). Peces del Sistema Arrecifal Lobos-Tuxpan, Veracruz, México. *Universidad y Ciencia*, 28(2), 191-208.

González-Gándara, C., Trinidad-Martínez, S. C. y Chávez-Morales, V. M. (2006). Peces ligados a *Thalassia testudinum* en el arrecife Lobos, Veracruz, México: diversidad y abundancia. *Revista de Biología Tropical*, 54(1), 189-194.

Greenfield, D. W. (1979). A review of the western Atlantic *Starksia ocellata-complex* (Pisces: Clinidae) with the description of two new species and proposal of superspecies status. *Fieldiana Zoology*, 73(2), 9-48.

Humann, P. & Deloach, N. (2014). Reef Fish Identification. Florida Caribbean Bahamas. Fourth Edition Copyright. New World Publications, Inc.

Lieske, E. y Myers R. (1998). Guía de identificación Peces de arrecifes Coralinos del Indo Pacífico y Caribe. Ediciones Omega, S.A.

Ortiz-Lozano, L., Gutiérrez-Velázquez, A., Aja-Arteaga, A., Argüelles-Jiménez, J., & Ramos-Castillo, V. (2021). Distribution, threats, and management of submerged reefs in the north of the reef corridor of the Southwest Gulf of Mexico. *Ocean and Coastal Management*, 201, 105428. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105428>.

Raffard, A., Cucherousset, J., Montoya, J., Richard, M., Acoca-Pidolle, S., Poésy, C., Garreu, Santoul, F., A., & Blanchet, S. (2021). Intraspecific diversity loss in a predator species alter prey community and ecosystem functions. *PLoS Biology*, 19(3): e3001145.

<https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001145>

Ramírez-Ruiz, C. I., Schmitter-Soto, J. J., & Díaz-Osorio, A. C. (2023). Interactions of coral reef cleaner species in the Mexican Caribbean. *Environmental Biology of Fishes*, 106: 1831-1850. <https://doi.org/10.1007/s10641-023-01459-1>

Rivera-Higueras, M. & Pérez-España, H. (2022). First record of the cryptic fishes *Ptereleotris calliura* (Gobiidae) and *Liopropoma rubre* (Serranidae) in the Veracruz Reef System, Mexico. *Ciencias Marinas*, 48: e3308. <https://doi.org/10.7773/cm.y2022.3308>

Robertson, D. R., Pérez-España H., Domínguez-Domínguez, O., Estapé C. J., & Estapé, A. M. (2019). An update to the inventory of shore-fishes from the Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano, Veracruz, México. *ZooKeys*, 882, 127-157. <https://doi.org/10.3897/zookeys.882.38449>

Robertson, D. R., Peña, E. A., Posada, J. M., Claro R. y Estapé, C. (2023). Peces Costeros del Gran Caribe: sistema de Información en línea. Version 3.0 Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales, Balboa, República de Panamá. [En línea]. Disponible en: <https://biogeodb.stri.si.edu/caribbean/es/pages>. Fecha de consulta: 21 de abril de 2024.

Rodríguez, J. G. (2008). Pequeños peces crípticos de arrecifes coralinos y áreas adyacentes en el Parque Nacional Morrocoy y Refugio de Fauna de Cuare, Venezuela. *Revista de Biología Tropical*, 56(Supl. 1), 247-254.

Rodríguez-Quintal, J. G. (2010). Peces criptobentónicos de arrecifes coralinos en el Parque Nacional Archipiélago de Los Roques, Caribe de Venezuela. *Revista de Biología Tropical*, 58(1), 311-324.

Taylor, M. S. & Akins, L. (2007). Two new species of *Elacatinus* (Teleostei: Gobiidae) from the Mexican coast of the Gulf of Mexico. *Zootaxa*, 1425, 45-51.

Tornabene, L., Baldwin, C., Weigt, L. A., & Pezold, F. (2010). Exploring the diversity of western Atlantic *Bathygobius* (Teleostei: Gobiidae) with cytochrome c oxidase-I, with descriptions of new species. *Aqua International Journal of Ichthyology*, 16(4), 141-170.

Van-der-Laan, R., Fricke, R., & Eschmeyer, W. N. (2024). Eschmeyer's catalog of fishes: classification. [En línea]. Disponible en: <http://www.calacademy.org/scientists/catalog-of-fishes-classification/>. Fecha de consulta: 22 de junio de 2024.

Williams, J. T. & Mounts, J. H. (2003). Descrip-

tions of six new Caribbean fish species in the genus *Starksia* (Labrisomidae). *Aqua Journal of Ichthyology and Aquatic Biology*, 6, 145-164.

Winkler, N. S., Paz-Goicoechea, M., Lamp, R. W., & Pérez-Matus A. (2017). Diet reveals links between morphology and foraging in a cryptic temperate reef fish. *Ecology and Evolution*, 7(24): 11124-11134. <https://doi.org/10.1002/ece3.3604>



Imágenes de Canva educativo

Evidencia sobre los efectos de la telerrehabilitación en fisioterapia en accidente cerebrovascular

Evidence on the effects of telerehabilitation in physiotherapy with stroke

Juan Bernardo Cifuentes-Marín*, Cecilia Nicole Sabelle-Garcés

RESUMEN

La telerrehabilitación (TR) ofrece una alternativa de servicios de rehabilitación a distancia a personas que han sobrevivido a un accidente cerebrovascular (ACV) y se ha convertido en una intervención prometedora para la administración remota supervisada de terapias físicas y otras terapias destinadas a mejorar los déficits motores y cognitivos de esta enfermedad. El objetivo del presente trabajo fue describir la evidencia existente de los efectos que tiene la TR en fisioterapia, en la recuperación motora de pacientes post-ACV. Se realizó una búsqueda en Pubmed, Cochrane, Scopus y EBSCO, de agosto a noviembre del 2022. Se utilizaron los términos "telerehabilitation" and "stroke", en artículos con un marco temporal de 5 años, en idioma inglés y español. Se localizaron 4 194 artículos, pero solo 13 artículos cumplieron con todos los criterios, 4 reunían evidencia de la TR en la recuperación de la función motora, 3 de la TR en la recuperación de las actividades de la vida diaria (AVD), 1 de la TR en la funcionalidad de extremidades, equilibrio, actividad física y participación, 1 de la TR en la función motora, AVD, independencia, satisfacción y calidad de vida, 1 de la TR en el equilibrio y movilidad funcional y, 3 de la TR en la percepción y aceptabilidad. Este trabajo proporciona bases argumentadas que indican que las intervenciones de TR tienen efectos similares sobre los déficits motores en comparación con la terapia convencional.

PALABRAS CLAVE: accidente cerebrovascular, telerrehabilitación, terapia física, discapacidad, ejercicio terapéutico.

ABSTRACT

Telerehabilitation (TR) offers an alternative for remote rehabilitation services to stroke survivors and has emerged as a promising intervention for the remote, supervised delivery of physical and other therapies aimed at improving the motor and cognitive deficits of this disease. The objective of the present study was to describe the existing evidence on the effects of TR in physical therapy on motor recovery in post-stroke patients. A search was conducted in PubMed, Cochrane, Scopus, and EBSCO from August to November 2022. The search terms used were "telerehabilitation" and "stroke," for articles in English and Spanish within a 5-year time frame and. 4 194 articles were identified, but only 13 articles met all the criteria: 4 provided evidence for TR on motor function recovery, 3 for TR on Activities of Daily Living (ADL) recovery, 1 for TR on limb function, balance, physical activity and participation, 1 for TR on motor function, ADL, independence, satisfaction and quality of life, 1 for TR on balance and functional mobility, and 3 for TR on perception and acceptability. This work provides a rationale that TR interventions have similar effects on motor deficits compared with conventional therapy.

KEYWORDS: stroke, telerehabilitation, physical therapy, disability, exercise therapy.

*Correspondencia: jcifuentesm@santotomas.cl/Fecha de recepción: 13 de noviembre de 2024/Fecha de aceptación: 30 de mayo de 2025/ Fecha de publicación: 6 de junio de 2025.

Universidad Santo Tomás, Facultad de Salud, carrera de Kinesiología, Rodríguez núm. 060, Temuco, Chile, C. P. 4801076.

INTRODUCCIÓN

Los accidentes cerebrovasculares (ACV) representan, entre las enfermedades no transmisibles (ENT), la segunda causa principal de muerte y la tercera causa principal de muerte y discapacidad combinadas en el mundo (Feigin y col., 2024).

La carga de discapacidad, tras un ACV, es considerable y particularmente alta en los países de ingresos bajos y medios (Feigin y col., 2023), llegando a representar un 87 % de las discapacidades (Kayola y col., 2023), especialmente en la población adulta mayor, en donde continúa en ascenso (Hershson, 2021; Naciones Unidas México, 2021).

Se estima que dos terceras partes de aquellos que han sufrido un ACV presentan secuelas que afectan su independencia y calidad de vida, por lo que requieren rehabilitación (Alessandro y col., 2020; Sánchez, 2023). Las afectaciones más frecuentes incluyen las motoras, cognitivas y/o sensoriales, así como alteración del control postural o equilibrio y, consecuentemente, un elevado riesgo de caída (Salgueiroa y Marquez, 2018). Aproximadamente, el 60 % de los supervivientes de un ACV desarrollará algún grado de discapacidad para realizar actividades de la vida diaria (AVD), tales como vestirse, alimentarse o desplazarse, lo que conlleva una significativa dependencia física (GBD 2019 Stroke Collaborators, 2021).

Se identifica un periodo crítico post-ACV, caracterizado por un incremento en la neuroplasticidad, durante el cual la respuesta cerebral a la lesión se intensifica, optimizando la eficacia de la rehabilitación (Coleman y col., 2017). La prontitud en la intervención rehabilitadora post-ACV se correlaciona directamente con mejores resultados (Alessandro y col., 2020). La evidencia clínica sugiere que, la rehabilitación, extendida hasta un año tras el alta hospitalaria, puede prevenir el deterioro funcional y preservar la capacidad para las AVD (Alessandro y col., 2020). La implementación temprana de estas intervenciones tie-

ne el potencial de maximizar la funcionalidad, minimizar la discapacidad, fomentar la adherencia al tratamiento y reducir la incidencia de complicaciones secundarias a largo plazo (Pigretti y col., 2019). En consecuencia, se reafirma la importancia de una atención temprana centrada en la rehabilitación y su continuidad a largo plazo.

La naturaleza prolongada del proceso de recuperación demanda la implementación de terapias especializadas, guiadas por un equipo multidisciplinario, donde se destaca el rol fundamental del fisioterapeuta (Appleby y col., 2019). Las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) han revolucionado la práctica clínica, permitiendo la implementación de modelos de atención personalizados a través de la telemedicina y la telerrehabilitación (TR). Estas modalidades facilitan la entrega de servicios de salud de manera oportuna y eficiente, independientemente de la ubicación geográfica del paciente (Appleby y col., 2019). Cuya finalidad es acercar la atención desde el centro de salud al hogar y así mantener un seguimiento del tratamiento del paciente y su reinserción en sus AVD (Appleby y col., 2019; Chen y col., 2020).

La TR permite que los pacientes reciban prácticas de rehabilitación por parte de fisioterapeutas que utilizan TIC, modalidad que se ha implementado ampliamente para la recuperación del ACV y que abre nuevas oportunidades para la terapia remota. Esta modalidad de terapia hace que la rehabilitación sea más accesible, especialmente para pacientes en áreas rurales y a quienes enfrentan obstáculos de transporte. La realidad virtual (RV) también se ha utilizado en la terapia post-ACV, en las funciones motoras de extremidades superiores (EESS), extremidades inferiores (EEII), control del equilibrio y la marcha (Chen y col., 2020).

Si bien, la evidencia sobre la TR en pacientes con ACV continúa expandiéndose, especialmente en lo que respecta a nuevas modalidades de intervención y la integración de tec-

nologías avanzadas, aún existen desafíos significativos (Núñez-Machuca y col., 2021). Los cuestionamientos sobre su efectividad se deben a aspectos metodológicos y técnicos que limitan su utilización masiva y comparativa (Laver y col., 2020) y hacen que se necesiten más estudios con conclusiones definitivas (Appleby y col., 2019).

En este contexto, se han identificado diversas áreas de investigación prioritarias, todas en revisiones sistemáticas, como la evaluación de la calidad de vida relacionada con la salud y la rentabilidad de la TR (Tchero y col., 2018), por lo que la confirmación de la efectividad de las intervenciones de rehabilitación física a distancia requiere una mayor atención (Rintala y col., 2019). Asimismo, la verificación de conclusiones existentes mediante estudios de alta calidad (Zhang y col., 2019) y el establecimiento de la equivalencia, con intervenciones supervisadas en entornos clínicos, son cruciales para consolidar la evidencia científica en los efectos de la TR (Schröder y col., 2019).

Adicionalmente, en la revisión sistemática de Laver y col. (2020) la heterogeneidad inherente a las intervenciones y a las variables de estudio dificulta la obtención de conclusiones definitivas sobre los efectos de la TR. Por lo tanto, se justifica la realización de investigaciones adicionales y actualizaciones para consolidar el respaldo científico de la TR en pacientes con ACV.

En la revisión sistemática de Niknejad y col. (2021) sobre la adopción de la TR, especialmente en países con recursos limitados, se establece que, también es fundamental evaluar estrategias para minimizar los fallos de implementación y para informar al personal sanitario y a los usuarios sobre estrategias de adopción exitosas. Por todo lo expuesto, la TR representa una opción de seguimiento temprano de usuarios post-ACV, en complemento con la rehabilitación presencial, más aún cuando la rehabilitación fisioterapéutica no puede iniciarse prontamente o existen inconvenientes para un número de sesiones suce-

sivas semanalmente, aunque debe hacerse insistencia en la actualización de su respaldo y de los efectos que esta TR tendrá en las secuelas del ACV.

El objetivo del presente trabajo fue describir la evidencia existente de los efectos en la recuperación motora de la TR en fisioterapia en paciente post-ACV.

MATERIALES Y MÉTODOS

Protocolo

Esta revisión de alcance se llevó a cabo de acuerdo con los criterios de la declaración PRISMA-ScR (Page y col., 2021), una guía estándar para la realización de revisiones sistemáticas y metaanálisis.

Criterios de elegibilidad

Se consideraron artículos de investigación como revisiones sistemáticas, de alcance, ensayos clínicos aleatorizados, ensayos prospectivos, serie de casos, métodos mixtos, estudios cualitativos, estudios piloto y revisiones narrativas y guías clínicas, todas con un marco temporal de 5 años, abarcando artículos científicos en inglés y español. La población de estudio fue en adultos, con una intervención destinada a la evidencia de los efectos en la recuperación motora de la TR en fisioterapia en pacientes post-ACV. Los criterios de exclusión fueron las intervenciones con TR basada en ambulancia y desempeño ocupacional, telemedicina, procedimientos médicos y diagnósticos.

Fuentes de información y estrategia de búsqueda

Se realizó una búsqueda de agosto a noviembre del 2022 en Pubmed, Cochrane, Scopus y EBSCO, para identificar artículos sobre intervenciones de TR en pacientes post-ACV. Se utilizaron como términos para la búsqueda "Telerehabilitation" and "Stroke".

Selección de fuentes de evidencia

Se empleó la herramienta Rayyan (Rayyan Systems 2022, Massachusetts, EUA) para organizar y administrar los estudios seleccionados,

mediante la eliminación de duplicados. Se realizó una evaluación inicial independiente, por dos revisores, basada en títulos y resúmenes. Los artículos considerados potencialmente relevantes fueron recuperados en su totalidad.

Extracción de datos

Tras la identificación de los artículos destacados, se procedió a su distribución equitativa de artículos entre los revisores para su análisis individual. Los datos extraídos de cada estudio fueron registrados en una hoja de cálculo de Excel, detallando el objetivo, la metodología, los resultados y las conclusiones. Posteriormente, se realizó una evaluación exhaustiva de cada estudio, enfocándose en las características que dan respaldo o no de la TR y sus efectos. Las discrepancias entre los revisores fueron resueltas mediante consenso a través de la discusión.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Selección de los estudios

La estrategia de búsqueda inicial arrojó 4 194 documentos. La eliminación de duplicados y registros no relevantes para el propósito de estudio, de acuerdo al título y/o resumen, dejó 3 974 artículos. De estos, 249 trabajos se encontraban en el rango establecido del periodo de publicación, pero solo se pudieron recuperar 29 a texto completo. Finalmente, 13 de los artículos localizados cumplieron con todos los criterios de inclusión, particularmente que trataran sobre aplicación de fisioterapia mediante TR a pacientes adultos post-ACV (Figura 1).

Características de la muestra

De los 13 artículos incluidos en esta investigación, 4 reunían evidencia de la TR en la recuperación de la función motora – funcionalidad de los segmentos corporales, 3 de la TR en la recuperación de las AVD, 1 funcionalidad de extremidades, equilibrio, actividad física y participación, 1 función motora, AVD, independencia, satisfacción y calidad de vida, 1 equilibrio y movilidad funcional, 3 evaluaron la percepción y aceptabilidad de la TR en pacientes post-ACV.

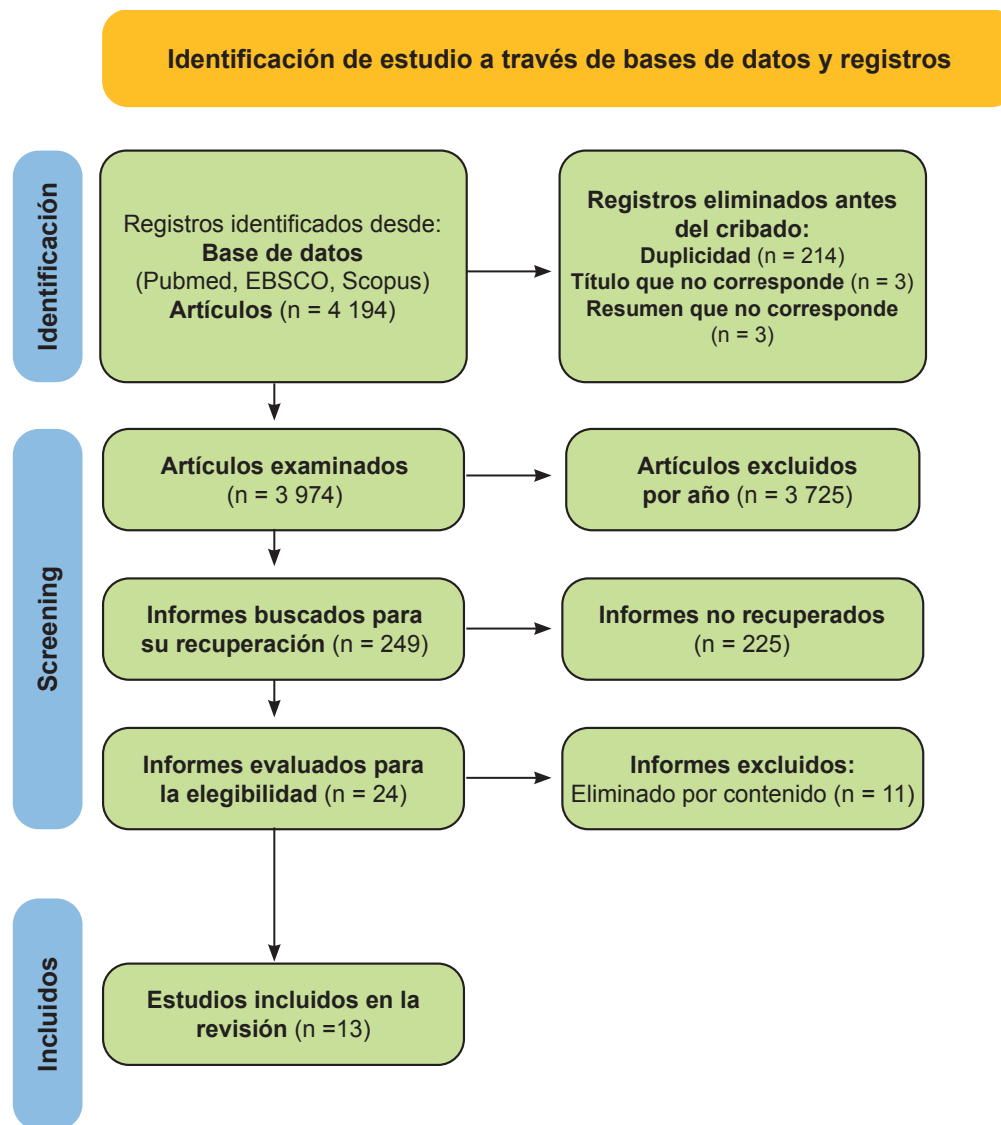
En la Tabla 1 se muestra un detallado análisis de las características de cada estudio incluido en este trabajo. Los hallazgos encontrados señalan la factibilidad de la TR para la mejora de la función motora, la cognición y la comunicación en paciente post-ACV (Nikolaev y Nikolaev, 2022). En general, las intervenciones de TR fueron efectivas mejorando la capacidad de AVD de los supervivientes del ACV (Saragih y col., 2022).

Capacidad motora y equilibrio

La TR se asoció a mejoras en recuperación de déficit motores, así como, en la disfunción cortical y la depresión (Sarfo y col., 2018). También existió viabilidad en la mejora de la escala Rankin Modificada (que mide el grado de discapacidad o dependencia en las actividades diarias) y la puntuación motora de Fugl-Meyer para EESS en pacientes post-ACV (Cramer y col., 2021). La TR mejoró la condición funcional, lo que resultó, consecuentemente, en una mejora en el bienestar y un retorno más rápido a la independencia post-ACV (Rintala y col., 2019; Ostrowska y col., 2021).

La TR, comparada con la atención clínica tradicional en los pacientes post-ACV, obtuvo ganancias motoras similares (Cramer y col., 2019). Y no se encontraron diferencias significativas de la TR con la atención tradicional y la atención combinada, en el Índice de Barthel, Fugl-Meyer para EESS y en la Escala de Impacto del ACV. De igual forma, Appleby y col. (2019) mencionaron que al comparar la terapia tradicional con la TR, esta última es tan efectiva como la primera en la función motora, las AVD, la independencia y la satisfacción/calidad de vida.

Respecto al equilibrio, Tchero y col. (2018) y Rintala y col. (2019), indicaron mejoras en los pacientes, posterior al ACV, sometidos a TR, similares a los sometidos a la atención tradicional. Asimismo, Schröder y col. (2019), informaron efectos iguales de la terapia mediante TR y la terapia de rehabilitación tradicional en el equilibrio y la movilidad funcional.



■ **Figura 1. Diagrama de flujo de información PRISMA.**
Figure 1. PRISMA information flow diagram.

Mecanismos para impartir TR

Dentro de las herramientas para la realización de la TR destacan el uso del teléfono y la videoconferencia como las más utilizadas (Stephenson y col., 2022). Otra opción son los videos, que muestran ser una herramienta factible y aceptable en la TR, que tendría un potencial de satisfacer las necesidades en entornos de recursos limitados de pacientes que han sufrido un ACV (Odetunde y col., 2020). Y no menos importante, el uso de la RV en la TR, que aumenta la adherencia y el disfrute de las intervenciones de rehabilitación a distancia (Schröder y col., 2019).

Consideraciones generales

La TR es una herramienta que permite mantener el seguimiento y rehabilitación de los pacientes con ACV. Sin embargo, en la literatura consultada, se plantean algunos cuestionamientos sobre su efectividad, debido a aspectos metodológicos y técnicos que limitan su utilización masiva y comparativa (Laver y col., 2020) y hacen que se necesiten más estudios con conclusiones definitivas, ya que la eficacia de la TR, que puede ser igual de efectiva que la atención presencial habitual, ha mostrado evidencia moderada, usando diversas estrategias de medición (Appleby y col., 2019).

■ Tabla 1. Características de los estudios incluidos en la revisión.
Table 1. Characteristics of the studies included in the review.

Autor(es) y Año	Tipo de estudio	Objetivo	Método	Resultados
Cramer y col. (2019) ^a	Ensayo clínico aleatorizado	Determinar si el tratamiento dirigido al movimiento del brazo, administrado a través de un sistema de TR domiciliario, tiene una eficacia comparable con la dosis equivalente a la terapia de intensidad equivalente administrada en un entorno clínico tradicional (CT) y para examinar si este sistema tiene una eficacia comparable para brindar educación sobre el ACV.	Ensayo aleatorizado cegado por el evaluador en 11 sitios de EE. UU. Incluyó 124 pacientes que habían experimentado un ACV de 4 a 36 semanas antes y tenían en el brazo déficits motores, para recibir terapia de TR en el hogar (grupo TR) o terapia en una clínica de terapia de rehabilitación para pacientes ambulatorios (grupo CT). Los participantes recibieron 36 sesiones (70 min cada una) de terapia motora del brazo más educación sobre ACV.	TR no es inferior a la terapia CT. Las ganancias motoras siguieron siendo significativas cuando los pacientes se inscribieron temprano (< 90 d) o tarde (≥ 90 d) después del ACV.
Chen y col. (2020) ^f	Estudio cualitativo	Investigar beneficios percibidos por el paciente y barreras para usar el sistema de TR en el hogar.	Se realizaron entrevistas semiestructuradas, y a profundidad a 13 pacientes en fase subaguda posterior al ACV y que habían completado una intervención de 6 semanas utilizando un sistema de TR basado en el hogar.	El sistema de TR estudiado proporcionó a los pacientes atención domiciliaria con acceso a juegos de rehabilitación, ejercicios, educación sobre ACV y terapeutas. La retroalimentación cualitativa de los participantes estableció que, la TR fue una herramienta prometedora para entregar terapias de rehabilitación de ACV de manera efectiva y remota a los pacientes en el hogar.
Laver y col. (2020) ^b	Revisión sistemática	Determinar si el uso de la TR conduce a una mejor capacidad para realizar las AVD entre los supervivientes de un ACV. En comparación con (1) la rehabilitación en persona; o (2) ninguna rehabilitación o atención habitual.	Se hicieron búsquedas en el Registro de ensayos del Grupo Cochrane de ACV (junio de 2019), en el Registro Cochrane Central de Ensayos Controlados (el Registro Cochrane Library, número 6 2019), MEDLINE (Ovid, 1946 a junio de 2019), Embase (1974 a junio de 2019) y 8 bases de datos adicionales. Se buscó el ensayo, registros y listas de referencias.	La evidencia no fue suficiente para sacar conclusiones sobre los efectos de la TR en la movilidad o la satisfacción de los participantes. Ningún estudio evaluó la rentabilidad de la TR. Dos estudios informaron sobre eventos adversos, aunque no graves. Actualmente, solo existe evidencia de nivel bajo o moderado que evalúa si la TR es una forma más efectiva o similar que la rehabilitación tradicional.

Continúa...

Odetunde y col. (2020) ^f	Estudio piloto	Desarrollar un programa de ejercicios en el hogar basado en videos (VHEP) para hablantes de lengua yoruba sobrevivientes de un ACV.	Se realizó un estudio descriptivo cualitativo en dos fases: desarrollo y pruebas de viabilidad. El desarrollo del VHEP siguió las recomendaciones de la Asociación Estadounidense de ACV.	El VHEP fue factible y aceptable entre la muestra de pacientes con ACV estudiada. Por lo tanto, la TR domiciliaria basada en vídeo para sobrevivientes de ACV tiene el potencial de satisfacer la creciente necesidad de telefisioterapia en entornos de recursos limitados.
Cramer y col. (2021) ^a	Ensayo prospectivo	Evaluar la viabilidad de un programa de TR ampliado.	Bajo la supervisión de un terapeuta autorizado, los adultos con ACV y extremidades con debilidad recibieron TR en el hogar (1 h/d, 6 d/semana) entregado mediante juegos y ejercicios.	Los inscritos (n = 13) tenían una mediana de edad de 61 años (rango 52 años a 65.5 años) y 129 d (rango 52 d a 486 d) después del ACV. La dosis media de tratamiento fue de 50.4 h (33.3 h a 56.7 h). Las puntuaciones de Rankin modificadas mejoraron en 6/13 pacientes. Las puntuaciones motoras de Fugl-Meyer aumentaron en 6 puntos en el brazo (2.5 puntos a 12.5 puntos) y 1 punto en pierna (- 0.5 puntos a 5 puntos). Por último, es posible la utilización de un programa ampliado de TR, que incluya aspectos diagnósticos, administración de medicamentos y otras actividades.
Ostrowska y col. (2021) ^b	Revisión narrativa	Analizar la beneficios y limitaciones de la TR en relación con la condición funcional de los pacientes post-ACV.	Se incluyeron publicaciones seleccionadas de 2019 a 2021 sobre la TR de pacientes con ACV. La revisión se basó en la lista de verificación de PRISMA.	Los estudios demuestran que la TR mejora significativamente la condición funcional de los pacientes que han sufrido un ACV, lo que resulta en una mejor calidad de vida y un retorno más rápido a la independencia.
Nikolaev y Nikolaev (2022) ^a	Revisión narrativa	Analizar los enfoques actuales de TR para la recuperación de los pacientes con ACV.	Se realizó búsqueda en 6 bases de datos en línea desde enero de 2018 hasta octubre de 2021, se incluyeron 70 investigaciones y revisiones. Se analizó la TR de 995 individuos, que se entregó de forma sincrónica y asincrónica.	Los hallazgos muestran que la TR es factible para mejorar la función motora, la cognición, el habla y la comunicación del lenguaje entre pacientes con ACV. Sin embargo, la dosis de las sesiones de TR varió significativamente.

Continúa...

Sarfo y col. (2018) ^a	Revisión sistemática	Proporcionar una revisión sistemática actualizada sobre la eficacia de las intervenciones de TR para la recuperación de la disfunción motora, cortical superior y la depresión posterior a un ACV entre los sobrevivientes de un ACV.	Se realizaron búsquedas en PubMed y en la biblioteca Cochrane desde el 1 de enero de 1980 hasta el 15 de julio de 2017, utilizando las siguientes palabras clave: “Telerehabilitation Stroke”, “Mobile Health Rehabilitation”, “Telemedicine Stroke Rehabilitation”, “Telerehabilitation”.	Las intervenciones de TR se centraron en la recuperación motora (n = 18), la depresión o la tensión del cuidador (n = 2) y la disfunción cortical superior (n = 2). En general, las intervenciones de TR se asociaron con mejoras significativas en la recuperación de déficits motores, en la disfunción cortical y depresión en los grupos de intervención en todos los estudios evaluados.
Tchero y col. (2018) ^b	Revisión sistemática y metaanálisis	Investigar la eficacia de la TR en pacientes que han sufrido un ACV.	Se realizó una búsqueda en MEDLINE, Cochrane Central y WOS. Se extrajeron datos continuos para obtener resultados relevantes y se analizaron utilizando el software RevMan.	Se incluyeron 15 estudios (1 339 pacientes), mientras que sólo 12 se incluyeron en el análisis agrupado. La estimación del efecto combinado no mostró diferencias significativas entre los grupos de TR y control en términos de Índice de Bartshel, Escala de equilibrio de Berg, Fugl-Meyer EESS y escala de impacto del ACV.
Rintala y col. (2019) ^d	Revisión sistemática	Estudiar la eficacia de las intervenciones de rehabilitación física a distancia basada en tecnología para el funcionamiento físico en el ACV.	Se realizó una búsqueda bibliográfica en 6 bases de datos: Cochrane Central Register of Controlled Trials (CCRCT), Cumulative Index to Nursing and Allied Health Literature (CINAHL), Excerpta Medica Database (EMBASE), Database of the National Library of Medicine (Ovid MEDLINE), Physiotherapy Evidence Database (PEDro), and Web of Science (WOS), desde enero de 2000 hasta mayo de 2018. La búsqueda identificó un total de 13 estudios elegibles.	Este trabajo sugiere que la efectividad de las prácticas físicas a distancia basadas en tecnología para la rehabilitación mejora las AVD, el funcionamiento de las EESS y EEII, el equilibrio, la actividad física, y la participación de manera similar en comparación con los tratamientos tradicionales en personas con ACV. Recomiendan realizar más investigaciones para confirmar la eficacia de las intervenciones de rehabilitación física a distancia basadas en tecnología para mejorar el funcionamiento físico de las personas con ACV.

Continúa...

Appleby y col. (2019) ^e	Revisión sistemática	Actualizar la base de evidencia actual sobre la efectividad de la TR en el ACV.	Se llevó a cabo una búsqueda en bases de datos de Medline Ovid; Embase; Emcare; Scopus; The Cochrane Biblioteca; PEDro; OTSeeker. Se realizó en abril de 2018 (actualizado en octubre de 2018). Fueron incluidos 13 ensayos controlados aleatorios.	Se realizó una amplia gama de intervenciones a través de diversos sistemas de TR y la eficacia se midió mediante diferentes estrategias. Esta revisión ha identificado un conjunto moderado de evidencia consistente que indica que la TR puede ser tan efectiva como la atención habitual para la función motora, las AVD, la independencia, la satisfacción/calidad de vida y otros resultados. Aunque los autores recomiendan realizar más estudios para unas conclusiones definitivas.
Schröder y col. (2019) ^e	Revisión sistemática	Investigar si es factible combinar la RV que permita hacer ejercicio en entornos tipo juego con TR en una población que sufrió un ACV y vive en la comunidad.	Se realizaron búsquedas en 5 bases de datos, por ejemplo, PubMed y Cochrane. Biblioteca. Se incluyeron ECAs y no ECAs que investigaran la viabilidad y eficacia de la RV.	Se incluyeron 7 estudios (n = 120), de los cuales son ECA. Existe evidencia sobre la adherencia a la terapia y disfrute percibido de la RV, así como el costo-beneficio de la TR. Se informan efectos iguales al comparar este enfoque con una intervención supervisada por un terapeuta en el entorno clínico sobre el equilibrio y la movilidad funcional.
Stephenson y col. (2022) ^f	Revisión sistemática	Explorar los factores que influyen en la realización de la TR del ACV, incluidas plataformas, requisitos técnicos, capacitación, soporte, acceso, costo, usabilidad y aceptabilidad.	Se llevó a cabo una búsqueda en las bases de datos de MEDLINE, EMBASE, CINAHL, WOS y Biblioteca Cochrane y Registro Central de Ensayos Clínicos. Se elaboró una síntesis narrativa que proporcionó una descripción completa de los factores que influyen en la realización de la intervención de TR para ACV.	Se incluyeron 31 estudios y 10 protocolos de estudios en curso. Las intervenciones fueron categorizadas como TR sincrónica (n = 9), TR asincrónica (n = 11) y teleapoyo (n = 11). El teléfono y la videoconferencia fueron las formas más frecuentes de entrega utilizados. Los principales hallazgos de esta revisión son que la TR post-ACV es generalmente utilizable y aceptable, y puede funcionar bien con la capacitación y la infraestructura técnica adecuadas.

ACV: Accidente Cerebrovascular. TR: Telerrehabilitación. EESS: Extremidades superiores. EEII: Extremidades Inferiores. RV: Realidad Virtual. ECA: Ensayo clínico Aleatorizado. ^aEvidencia de la TR en la recuperación de la función motora – funcionalidad de los segmentos corporales. ^bEvidencia de la TR en la recuperación de las AVD. ^cEvidencia de la función motora, AVD, independencia, satisfacción y calidad de vida. ^dEvidencia de la TR en la funcionalidad de extremidades, equilibrio, actividad física y participación. ^eEvidencia de la TR en el equilibrio y movilidad funcional. ^f Evaluación de la percepción y aceptabilidad de la TR en pacientes post-ACV.

Entre sus beneficios destacan que es una herramienta prometedora para su aplicación de manera remota (Chen y col., 2020) y tiene el potencial de adaptarse a situaciones extremas, como lo fue el COVID-19 (Delfino y col., 2022). En dicho periodo, su usabilidad y aceptación fue alta en todos los países consultados (Stephenson y col., 2022), también la adherencia y satisfacción fueron buenas y no hubo complicaciones graves (Ramage y col., 2021). Existe evidencia de adherencia y disfrute percibido de la RV en TR, así como el costo-beneficio de ésta en pacientes post-ACV (Schröder y col., 2019). Y la TR es percibida como una herramienta prometedora, con aceptación cada vez más grande del uso de las tecnologías en las sesiones remotas (Chen y col., 2020).

Entre las limitaciones se debe considerar que, aunque la TR puede tener un impacto positivo, posterior a un ACV, la evidencia actual requiere de más claridad y uniformidad, pues existe una gran variedad de formas de TR y de cómo medir sus efectos (Appleby y col., 2019), la dosis de las sesiones de TR varía significativamente entre los estudios (Nikolaev y Nikolaev, 2022), y existe limitada evidencia de eficiencia de alta calidad (Ramage y col., 2021; Qin y col., 2022). Ningún estudio ha evaluado rentabilidad de la TR (Laver y col., 2020), ni la rehabilitación mediada por cuidadores (Qin y col., 2022); faltan más estudios que midan la funcionalidad física en TR (Rintala y col., 2019) y no han sido consideradas la estratificación de los pacientes según la gravedad del ictus y el tiempo transcurrido desde su inicio, ni las consideraciones de grupos de control (Qin y col., 2022).

Las investigaciones sobre la implementación de la TR se encuentran en una etapa inicial, que demanda una mayor atención por parte de la comunidad científica del sector salud, especialmente en contextos con recursos limitados. En este sentido, los estudios que analizan la adopción de la TR son fundamentales para minimizar los errores en su aplicación, ya que proporcionan información valiosa tanto para el personal sanitario como

para los usuarios, facilitando el desarrollo de estrategias de adopción exitosas (Niknejad y col., 2021).

Si bien, la TR no reemplaza la terapia convencional, esta herramienta proporciona una vía ágil para atender las necesidades inmediatas de los pacientes post-ACV, permitiendo una detección temprana de complicaciones y facilitando el monitoreo continuo de la adherencia al tratamiento (Chang y col., 2021).

En cuanto a las limitaciones del trabajo, es importante reconocer la posible omisión de información potencialmente valiosa, derivada de la exclusión de bases de datos a las que solo se tiene acceso por suscripción y del acceso restringido a artículos con requerimientos de pago. Asimismo, la naturaleza dinámica del campo de investigación implica que nuevos estudios, publicados más allá del periodo de revisión, podrían haber aportado información trascendental.

CONCLUSIONES

La fisioterapia mediante TR es una modalidad prometedora, cuando la presencialidad se dificulta por contextos geográficos o de confinamiento. Se ha demostrado que tiene efectos benéficos en la función motora de EESS y EEII, aumento en las AVD, el equilibrio, la movilidad funcional, la independencia y la satisfacción/calidad de vida. También ha mostrado ser eficiente al combinarse con la rehabilitación fisioterapéutica presencial, e incluso como modalidad alternativa. Es recomendable desarrollar más investigaciones con protocolos de TR, para obtener datos comparables en cuanto a sus efectos, considerando sujetos de estudio con diferente nivel de secuelas o por condiciones geográficas, rural vs urbano.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declararon no tener conflictos de intereses de ningún tipo.

REFERENCIAS

- Alessandro, L., Olmos, L., Bonamico, L., Muzio, D., Ahumada, M., Russo, M., Allegri, R., Gianella, M., Campora, H., Delorme, R., Vescovo, M., Lado, V., Mastroberti, L., Butus, A., Galluzzi, H., Décima, G. y Ameriso, S. (2020). Rehabilitación multidisciplinaria para pacientes adultos con accidente cerebrovascular. *Medicina* (B. Aires), 80(1), 54-68. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0025-76802020000100008&lng=es
- Appleby, E., Gill, S. T., Hayes, L. K., Walker, T. L., Walsh, M., & Kumar, S. (2019). Effectiveness of telerehabilitation in the management of adults with stroke: A systematic review. *Plos One*, 14(11), e0225150. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225150>
- Chang, M. P., Davancens, A., Rourich, M. C., Vincenti, J. M., Valencia, P., Guarriello, M. F., Costilla, C. M. y Estol, C. J. (2021). Telemedicina en prevención secundaria y rehabilitación del accidente cerebrovascular durante la pandemia por COVID-19 [Telemedicine in secondary prevention and rehabilitation of stroke during the COVID-19 pandemic]. *Medicina*, 81(3), 415-420. <https://www.medicinabuena-saires.com/PMID/34137702.pdf>
- Chen, Y., Chen, Y., Zheng, K., Dodakian, L., See, J., Zhou, R., Chiu, N., Augsburg, R., McKenzie, A., & Cramer, S. (2020). A qualitative study on user acceptance of a home-based stroke telerehabilitation system. *Topics in Stroke Rehabilitation*, 27(2), 81-92. <https://doi.org/10.1080/10749357.2019.1683792>
- Coleman, E. R., Moudgal, R., Lang, K., Hyacinth, H. I., Awosika, O. O., Kissela, B. M. y Feng, W. (2017). Rehabilitación temprana después de un accidente cerebrovascular: una revisión narrativa. *Curr Atheroscler*, 19(12):59. <https://doi.org/10.1007/s11883-017-0686-6>
- Cramer, S. C., Dodakian, L., Le, V., McKenzie, A., See, J., Augsburg, R., Zhou, R. J., Raefsky, S. M., Nguyen, T., Vanderschelden, B., Wong, G., Bandak, D., Nazarai, L., Dhand, A., Scacchi, W., & Heckhausen, J. A (2021). Feasibility Study of Expanded Home-Based Telerehabilitation After Stroke. *Frontiers in Neurology*, 11, 611453. <https://doi.org/10.3389/fneur.2020.611453>
- Cramer, S. C., Dodakian, L., Le, V., See, J., Augsburg, R., McKenzie, A., Zhou, R. J., Chiu, N. L., Heckhausen, J., Cassidy, J. M., Scacchi, W., Smith, M. T., Barrett, A. M., Knutson, J., Edwards, D., Putri, D., Agrawal, K., Ngo, K., Roth, E. J., & Tirschwell, D. L. (2019). Efficacy of Home-Based Telerehabilitation vs In-Clinic Therapy for Adults After Stroke: A Randomized Clinical Trial. *JAMA Neurology*, 76(9), 1079-1087. <https://doi.org/10.1001/jamaneurol.2019.1604>
- Delfino, C., Mazzon, E., Cavada, G., Muñoz-Venturelli, P., Brunser, A. M., Jurado-Díaz, F., Cisternas, L. L., Rocha-Jiménez, D., Arévalo-Valdivia, M., Rojas-Torres, D., & Mansilla, E. (2022). A Chilean Experience of Telestroke in a COVID-19 Pandemic Year. *Cerebrovascular diseases (Basel, Switzerland)*, 51(5), 690-694. <https://doi.org/10.1159/000523920>
- Feigin, V. L., Abate, M. D., Abate, Y. H., Abd El Hafeez, S., Abd-Allah, F., Abdelalim, A., & Arifin, H. (2024). Global, regional, and national burden of stroke and its risk factors, 1990-2021: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021. *The Lancet Neurology*, 23(10), 973-1003.
- Feigin, V. L., Owolabi, M. O., & World Stroke Organization-Lancet Neurology Commission Stroke Collaboration Group (2023). Pragmatic solutions to reduce the global burden of stroke: a World Stroke Organization-Lancet Neurology Commission. *The Lancet Neurology*, 22(12), 1160-1206. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(23\)00277-6](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(23)00277-6)
- GBD 2019 Stroke Collaborators (2021). Global, regional, and national burden of stroke and its risk factors, 1990-2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *Lancet Neurol*, 20(10), 795-820. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(21\)00252-0](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(21)00252-0)
- Hershson, A. (2021). Del nivel socioeconómico al riesgo cardiovascular. *Revista Argentina de Cardiología*, 89(4), 383-384.
- Kayola, G., Mataa, M. M., Asukile, M., Chishimba, L., Chomba, M., Mortel, D., Nutakki, A., Zimba, S., & Saylor, D. (2023). Stroke Rehabilitation in Low-and Middle-Income Countries: Challenges and Opportunities. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 102(2S Suppl 1), S24-S32. <https://doi.org/10.1097/PHM.0000000000002128>
- Laver, K. E., Adey-Wakeling, Z., Crotty, M., Lannin, N. A., George S., & Sherrington C. (2020). Telerehabilitation services for stroke. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 1(1), CD010255. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD010255.pub3>
- Naciones Unidas México (2021). Cada año, las enfermedades del corazón causan 2 millones de

muertes. [En línea]. Disponible en: <https://mexico.un.org/es/155362-cada-a%C3%B1o-las-enfermedades-del-coraz%C3%B3n-causan-2-millones-de-muertes>. Fecha de consulta: 1 de diciembre de 2024.

Niknejad, N., Ismail, W., Bahari, M., & Nazari, B. (2021). Understanding Telerehabilitation Technology to Evaluate Stakeholders' Adoption of Telerehabilitation Services: A Systematic Literature Review and Directions for Further Research. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 102(7), 1390–1403. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2020.12.014>

Nikolaev, V. & Nikolaev, A. (2022). Recent Trends in Telerehabilitation of Stroke Patients: A Narrative Review. *NeuroRehabilitation*, 51(1), 1-22. <https://doi.org/10.3233/NRE-210330>

Núñez-Machuca, M. F., Meneses-Castaño, C. Y., Penagos, P. T. y Beltrán-Arias, A. F. (2021). La Telerehabilitación como Estrategia de Atención en Salud. *Movimiento Científico*, 15(1), 1–7. <https://doi.org/10.33881/2011-7191.mct.15104>

Odetunde, M. O., Binuyo, O. T., Maruf, F. A., Ayenowowon, S. O., Okonji, A. M., Odetunde, N. A., & Mbada, C. E. (2020). Development and Feasibility Testing of Video Home Based Telerehabilitation for Stroke Survivors in Resource Limited Settings. *International Journal of Telerehabilitation*, 12(2), 125-136. <https://doi.org/10.5195/ijt.2020.6321>

Ostrowska, P. M., Śliwiński, M., Studnicki, R., & Hansdorfer-Korzon, R. (2021). Telerehabilitation of Post-Stroke Patients as a Therapeutic Solution in the Era of the Covid-19 Pandemic. *Healthcare*, 9(6), 654. <https://doi.org/10.3390/healthcare9060654>

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., & Mulrow, C. D. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, 71. <https://www.bmj.com/content/372/bmj.n71>

Pigretti, S. G., Alet, M. J., Mamani, C. E., Alonzo, C., Aguilar, M., Álvarez, H. J., Ameriso, S., Andrade, M. G., Arcondo, F., Armenteros, C., Arroyo, J., Beigelman, R., Bonardo, P., Bres-Bullrich, M., Cabello, C., Camargo, G., Camerlingo, S., Cárdenas, R., Chaves, H., ... y Zurrú, M. C. (2019). Consenso sobre accidente cerebrovascular isquémico agudo. *Medicina* (Buenos Aires), 79(Supl. 2), 1-46.

Qin, P., Cai, C., Chen, X., & Wei, X. (2022). Effect of home-based interventions on basic activities of daily living for patients who had a stroke: a systematic review with meta-analysis. *BMJ open*, 12(7),

e056045. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2021-056045>

Ramage, E. R., Fini, N., Lynch, E. A., Marsden, D. L., Patterson, A. J., Said, C. M., & English, C. (2021). Look Before You Leap: Interventions Supervised via Telehealth Involving Activities in Weight-Bearing or Standing Positions for People After Stroke-A Scoping Review. *Physical Therapy*, 101(6), pzab073. <https://doi.org/10.1093/ptj/pzab073>

Rintala, A., Päivärinne, V., Hakala, S., Paltamaa, J., Heinonen, A., Karvanen, J., & Sjögren, T. (2019). Effectiveness of technology-based distance physical rehabilitation interventions for improving physical functioning in stroke: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 100(7), 1339-1358. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2018.11.007>

Salgueiroa, C. y Marquez, J. (2018). Influencia del entrenamiento visual en el control postural de pacientes con accidente cerebrovascular crónico: estudio piloto aleatorizado controlado. *Fisioterapia*, 40 (6), 284-290. <https://doi.org/10.1016/j.ft.2018.07.001>

Sánchez, H. (2023). Rehabilitación post-ACV. *Revista de la Sociedad Argentina de Diabetes*, 57(3 Sup), 24–25. <https://doi.org/10.47196/diab.v57i3Sup.684>

Saragih, I. D., Tarihoran, D. E. T. A. U., Batubara, S. O., Tzeng, H. M., & Lin, C. J. (2022). Effects of telehealth interventions on performing activities of daily living and maintaining balance in stroke survivors: A systematic review and meta-analysis of randomised controlled studies. *Journal of Clinical Nursing*, 31(19-20), 2678-2690. <https://doi.org/10.1111/jocn.16142>

Sarfo, F. S., Ulasavets, U., Opere-Sem, O. K., & Ovbiagele, B. (2018). Tele-Rehabilitation after Stroke: An Updated Systematic Review of the Literature. *Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases: the Official Journal of National Stroke Association*, 27(9), 2306-2318. <https://doi.org/10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2018.05.013>

Schröder, J., van-Criekinge, T., Embrechts, E., Celis, X., van-Schuppen, J., Truijen, S., & Saeys, W. (2019). Combining the benefits of tele-rehabilitation and virtual reality-based balance training: a systematic review on feasibility and effectiveness. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, 14(1), 2-11. <https://doi.org/10.1080/17483107.2018.1503738>

Stephenson, A., Howes, S., Murphy, P. J., Deutsch, J. E., Stokes, M., Pedlow, K., & McDonough, S. (2022).

Factors influencing the delivery of telerehabilitation for stroke: A systematic review. *PLoS One*, 17(5), e0265828. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0265828>

Tchero, H., Tabue-Teguo, M., Lannuzel, A., & Rusch, E. (2018). Telerehabilitation for Stroke Survivors: Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Medical Internet Research*, 20(10), e10867. <https://doi.org/10.2196/10867>

Zhang, S., Zhang, W., & Zhou, G. (2019). Extended Risk Factors for Stroke Prevention. *Journal of the National Medical Association*, 111(4), 447–456. <https://doi.org/10.1016/j.jnma.2019.02.004>



Imagen tomada de: Canva educativo

Efecto en la cicatrización de heridas inducido por proteínas de *Mangifera indica* var. manila en fibroblastos humanos

Wound healing effect induced by *Mangifera indica* var. manila proteins in human fibroblast

Gloria Barrera-Morales^{1,2}, Alma Vázquez-Luna¹, Leticia Nicolás-Toledo², Yessica Eduvigis Zamudio-Cuevas^{3*}

RESUMEN

La medicina ayurveda ha reportado el uso de *Mangifera indica* L. (mango) para la cicatrización de heridas ocasionadas por picaduras y mordeduras de ciertos animales. El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto cicatrizante de las proteínas de mango *in vitro* en un modelo de herida-cicatriz en fibroblastos humanos. Las proteínas totales de la pulpa de mango fueron aisladas y cuantificadas usando el método de Bradford. Posteriormente, las muestras fueron liofilizadas y cuantificadas por el método BCA. La electroforesis SDS-PAGE fue usada para la separación e identificación de las fracciones proteicas. Se realizaron ensayos de citotoxicidad a 24 h de las proteínas (0.25 µg/mL, 2.5 µg/mL y 25 µg/mL) en los fibroblastos humanos. El ensayo herida-cicatriz fue llevado a cabo a través de un raspado en el cultivo de fibroblastos, midiendo la longitud de la herida mediante microscopía, después de los tratamientos con las diferentes concentraciones de proteínas a 24 h y 48 h. Se calculó el porcentaje de cierre de herida. Las proteínas de mango aisladas presentaron un peso molecular entre 10 kDa y 95 kDa y similar al control ($P < 0.05$) no indujeron citotoxicidad o cambios morfológicos en los fibroblastos a las concentraciones utilizadas. El tratamiento utilizando 0.25 µg/mL de proteínas de mango sugiere un incremento en la migración de los fibroblastos que podría favorecer el cierre de la herida.

PALABRAS CLAVE: cicatrización de heridas, fibroblastos humanos, proteínas de mango, migración celular, ensayo herida-cicatriz.

ABSTRACT

Ayurvedic medicine has reported the use of *Mangifera indica* L (mango) to heal wounds caused by stings and bites from certain animals. The aim of this study was to evaluate the healing effects of mango proteins *in vitro* in a wound scar model in human fibroblasts. The total proteins from mango pulp were isolated and quantified using the Bradford method and subsequently the samples were lyophilized and quantified by BCA. SDS-PAGE electrophoresis was used for the separation and identification of the protein fractions. Assays to determine protein cytotoxicity were performed by quantifying fibroblast viability at different protein concentrations (0.25 µg/mL, 2.5 µg/mL, and 25 µg/mL). The scratch wound assay was carried out through scraping the fibroblast culture, with wound length being measured via microscopy after treatment with the different protein concentrations at 24 h, and 48 h and the percentage of wound closure being calculated. The isolated mango proteins had a molecular weight between 10 kDa and 95 kDa and similar to the control ($P < 0.05$) they did not induce cytotoxicity or morphological changes in fibroblasts at the concentrations used. The treatment using a 0.25 µg/mL protein suggests an increase in fibroblast migration that could favor wound closure.

KEYWORDS: wound healing, human fibroblasts, mango proteins, cell migration, essay wound scar.

*Correspondencia: yesszamudio@gmail.com/Fecha de recepción: 20 de diciembre de 2024/Fecha de aceptación: 27 de mayo de 2025/ Fecha de publicación: 6 de junio de 2025.

¹Universidad Veracruzana, Instituto de Ciencias Básicas, Xalapa, Veracruz, México, C. P. 91190. ²Universidad Autónoma de Tlaxcala, Centro Tlaxcala Biología de la Conducta, Tlaxcala, Tlaxcala, México, C. P. 90070. ³Instituto Nacional de Rehabilitación "Luis Guillermo Ibarra Ibarra", Laboratorio de Líquido Sinovial, Calzada México-Xochimilco núm. 289, col. Arenal de Guadalupe, Tlalpan, Ciudad de México, México, C. P. 14389.

INTRODUCCIÓN

La cicatrización es un proceso biológico cuya finalidad es reparar el tejido dañado hasta la formación de una cicatriz. Es un proceso complejo, el cual está controlado por moléculas y factores de crecimiento. Para llevarlo a cabo se requieren diversas células, como queratinocitos, fibroblastos y células inflamatorias, además de mediadores inmunológicos como factores de crecimiento, y mensajeros químicos, como las interleucinas, quimiocinas y proteínas de la matriz celular (ECM, por sus siglas en inglés: extracellular matrix) (Fernández-Guarino y col., 2023), las cuales se organizan de tal manera que puedan establecer reacciones e interrelaciones celulares y su proliferación está mediada por citocinas liberadas al medio extracelular. Dicho proceso se activa una vez que se produce una herida (Lin y col., 2023).

En condiciones normales, la cicatrización se realiza sin complicaciones; sin embargo, en algunas patologías crónicas degenerativas, como la diabetes y obesidad, las heridas tardan más en cicatrizar, originando problemas de infecciones por microorganismos (Raziyeva y col., 2021). El uso indiscriminado de tratamientos a base de cortisona, en pacientes con algún tipo de artritis, asma e inmunosuprimidos y la utilización de cremas antibacterianas durante períodos prolongados de tiempo, afectan la estructura y funcionalidad de la piel, ya que estas contienen neomicina, polimixina B y bacitracina; compuestos que ocasionan prurito, ardor, irritación, enrojecimiento y erupciones (Punjataewkupt y col., 2019).

La diabetes es una de las patologías con mayor incidencia de complicaciones en los procesos de cicatrización y se estima que a la fecha existen 451 millones de personas a nivel mundial que padecen esta enfermedad. Los daños colaterales que presentan los pacientes diabéticos son principalmente úlceras de presión y úlceras del pie diabético (Ousey y col., 2018).

Mangifera indica L. (mango) pertenece a la familia Anacardiaceae y es uno de los frutos

con mayor demanda comercial a nivel mundial. Se cultiva en regiones tropicales y subtropicales incluyendo a México (Marquínez y col., 2023). El mango es una fuente importante de fibra, además de tener un alto valor nutricional por su contenido en vitaminas, minerales, polifenoles, carotenos, ácido ascórbico, fitoquímicos, carbohidratos y proteínas (Quintana y col., 2021; Lenucci y col., 2022; Rajasekaran y Soundarapanduan, 2023).

En la medicina ayurveda (medicina tradicional india), el mango y sus componentes han sido valorados por sus propiedades terapéuticas, como su capacidad antiinflamatoria y cicatrizante (Shah y col., 2010). Se han utilizado para tratar diversos tipos de heridas, incluidas las mordeduras de serpientes y otros animales (Pithayanukul y col., 2009). Sin embargo, la mayoría de los estudios se han centrado en evaluar los efectos de los compuestos fitoquímicos, principalmente taninos, flavonoides y triterpenos (Kumar y col., 2021; Rajasekaran y Soundarapandian, 2023).

En un modelo de ratones machos blancos Swiss donde se estudió el efecto del extracto de hoja de mango en la cicatrización de heridas, se demostró mejoría en el proceso de cicatrización (Suhatri y col., 2022). Además, se estableció un efecto favorable del extracto de hojas de mango sobre la formación de colágeno y el aumento de la epitelización de heridas en ratas Sprague Dawley. Estas propiedades curativas se atribuyeron principalmente a los taninos presentes en el mango (Nuevo y Bernardino, 2013).

Para reducir el uso de animales en experimentos médicos, se han desarrollado varios modelos humanos *in vitro* que permiten investigar la movilidad celular durante la cicatrización de heridas. Se ha descrito la movilidad de queratinocitos, melanocitos, fibroblastos y células endoteliales, ya que son las células residentes encargadas de restaurar las principales características estructurales de la piel (Hofmann y col., 2023). El interés en los fibroblastos como modelo de migración

celular, se debe a que estos pueden proporcionar un método para evaluar la cicatrización de heridas (Grupta y col., 2022).

En los últimos años, el papel de las proteínas de mango ha llamado la atención, no sólo desde el punto de vista alergénico, sino también porque tienen un posible efecto sobre la viabilidad celular (Herbert-Doctor y col., 2017). Hasta ahora, no queda claro el papel de las proteínas del mango en los mecanismos de migración y proliferación necesarios para la curación de heridas.

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto cicatrizante de las proteínas de mango en un modelo de herida-cicatriz en fibroblastos humanos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materia prima

Los frutos de mango (*Mangifera indica* var. manila) fueron recolectados en estado de madurez fisiológica en la población de Jalcomulco, Veracruz, México, durante los meses de junio y julio de 2020. La fruta fue separada de la cáscara para obtener el extracto proteico a partir de la pulpa.

Obtención de los extractos proteicos

Se obtuvieron los extractos proteicos conforme a las especificaciones de Zhou y col. (2016) con las siguientes modificaciones. La pulpa de mango fue fragmentada y congelada en nitrógeno líquido y disgregada mecánicamente hasta su completa pulverización. Se pesaron 2.5 g del mango pulverizado y se adicionaron 25 mL de Tris-HCL 0.5M (pH 7.2), agentes desnaturizantes como el dodecil sulfato de sodio (SDS, por sus siglas en inglés: sodium sulfate dodecyl) al 1 % y agentes reductores como el β -mercaptoetanol al 0.5 % para la lisis de la matriz alimentaria y la obtención de las proteínas por agitación, y posterior centrifugación a 18 560 xg (Sorvall Super T21, USA) durante 30 min.

Las proteínas fueron obtenidas del sobrenadante usando metanol-cloroformo, mezclándose hasta su completa disolución. Posteriormente,

fueron centrifugadas a 2 016 xg por 6 min. Después, las proteínas fueron mezcladas con acetona fría 1:2 para inducir su precipitación y centrifugadas a 2 016 xg por 6 min, decantándose y volviéndose a precipitar hasta que los residuos de acetona se eliminaron. Las proteínas fueron resuspendidas en 1 mL de amortiguador de fosfatos (PBS, por sus siglas en inglés: phosphate-buffered saline) y almacenadas a -20°C. Se cuantificaron, empleando el método de Bradford. La electroforesis en gel de poliacrilamida (PAGE, por sus siglas en inglés: Polyacrylamide Gel Electrophoresis) y SDS, fue realizada para su identificación, utilizando 10 mg/ μ L de proteínas disueltas en amortiguador Laemmli, el cual contiene SDS y β -mercaptoetanol, que se unen a las proteínas y rompen los enlaces no covalentes que mantiene su estructura tridimensional, con lo cual se logra una mayor separación de las proteínas de acuerdo a su peso molecular. Adicionalmente, se realizó una comparación de proteínas disueltas en amortiguador Laemmli sin β -mercaptoetanol para comparar la separación de las proteínas. Con la finalidad de conservar sus propiedades, los extractos proteicos fueron liofilizados (Labconco, 4.5 L. USA) mediante un proceso de secado por congelación durante 24 h y cuantificados por el método del ácido bicinonínico (BCA, por sus siglas en inglés: Bicinchoninic Acid). Los tratamientos para su aplicación en el modelo *in vitro* se diseñaron de acuerdo a dosis reportadas previamente de 25 μ g/mL, y a partir de esa concentración se realizaron diluciones seriadas de 2.5 μ g/mL y 0.25 μ g/mL (Conejero y col., 2007). Las proteínas se disolvieron en medio de cultivo Eagle modificado por Dulbecco (DMEM, por sus siglas en inglés: Dulbecco's modified eagle medium).

Preparación de los tratamientos celulares

Se prepararon cuatro soluciones de trabajo (stock), disolviendo por separado 50 mg de proteínas liofilizadas en 5 mL de medio de cultivo DMEM, con un mezclador vortex (Fiznevortex FinePCR, Daigger, Korea). Para incorporar las proteínas al medio de cultivo e incrementar su solubilidad, se utilizaron cua-

tro técnicas: centrifugación, filtración, mezcla con dimetilsulfóxido (DMSO, por sus siglas en inglés: dimethyl sulfoxide) y concentración a través de columnas de ultrafiltración Vivaspin™ 3000MWCO. En la primera técnica, la solución homogenizada se centrifugó a 1.9 xg por 4 min a 4 °C. En la segunda, la solución se filtró utilizando una membrana (Merck-Millipore) de 0.45 µm. A la tercera solución se le adicionó 0.1 % de DMSO (Sigma-Aldrich) mezclado por agitación, y posteriormente se filtró en una membrana de 0.45 µm. Por último, la cuarta solución homogenizada se incubó en baño de agua (Termobañó AR-371D, México) a 37 °C por 30 min, posteriormente se centrifugó a 5.8 xg por 6 min a 4 °C, obteniéndose el sobrenadante, el cual se filtró en una membrana y después se depositó en una columna de ultrafiltración Vivaspin™ 3000MWCO, centrifugándose a 13 257 xg durante 20 min a 4 °C. De las cuatro soluciones se recuperó el sobrenadante para la cuantificación de proteínas por BCA.

Cultivo celular

Se obtuvieron fibroblastos de piel humana, provenientes de tres pacientes del banco de criopreservación (-195.8 °C) del Instituto Nacional de Rehabilitación Luis Guillermo Ibarra Ibarra (INR-LGII) de la Ciudad de México, México. Estas células fueron obtenidas de remanentes de cirugías de abdominoplastia de pacientes que firmaron un consentimiento informado para su inclusión antes de participar en el estudio, el cual, fue conducido de conformidad con la Declaración de Helsinki, y el protocolo fue aprobado por el Comité de Ética CONBIOETICA-09-CEI-031-201711207 (Identificación del proyecto 78/15) del INR-LGII.

Los fibroblastos fueron descongelados en primer pase (primera etapa en donde crecen los fibroblastos en medio de cultivo) y expandidos con DMEM conteniendo 10 % de suero fetal bovino (FBS, por sus siglas en inglés: fetal bovine serum) y 1 % antibiótico-antimicótico (penicilina-estreptomina PE, Gibco). El medio de cultivo fue reemplazado con medio fresco cada tercer día hasta que las células alcan-

zaron una confluencia de 80 % a 90 % en el frasco de cultivo.

Ensayo de viabilidad celular

En una placa de 24 pozos, se colocaron 35 000 células por pozo con medio DMEM con 10 % FBS y 1 % PE. Las células se cultivaron durante 24 h y posteriormente se retiró el medio de cultivo, agregándole medio DMEM al 2 % de FBS conteniendo las diferentes dosis de proteínas de mango (25 µg/mL, 2.5 µg/mL y 0.25 µg/mL). Las células fueron estimuladas durante 24 h para determinar los efectos tóxicos inducidos por las proteínas de mango, a través de la identificación de cambios morfológicos en las células mediante microscopía de campo claro y la técnica de Flick y Gifford (1984), que incorpora el colorante cristal violeta para cuantificar las células vivas. Se utilizó un grupo de células control (células sin proteínas). A las células se les retiró el medio de cultivo y los tratamientos mediante lavados con PBS y se fijaron usando glutaraldehído al 2.5 % (Hycel); la tinción se realizó con cristal violeta al 0.1 % (Sigma-Aldrich). Se documentaron los cambios morfológicos a través de fotografías, con un microscopio EVOS FL (modelo L1113-178C-173, Thermo Scientific, W. A., United States). La absorbancia se cuantificó a 595 nm en un lector de microplacas Biorad Mark (10176) Japan. Las absorbancias se normalizaron al % de viabilidad celular de las células control, de las cuales 100 % se consideraron viables (Krebs y col., 2018).

Ensayo herida-cicatriz

Se realizaron ensayos herida-cicatriz utilizando placas de cultivo de 6 pozos conteniendo 150 000 fibroblastos por pozo, los cuales fueron cultivados, y al alcanzar 80 % de confluencia, estos fueron pretratados con 10 µg/mL de mitomicina C (Sigma-Aldrich) por 4 h para descartar la influencia de la proliferación celular en el cierre de la herida. Se llevaron a cabo estudios adicionales sin el uso de mitomicina C.

Se realizó un raspado por la mitad de la superficie del pozo utilizando una punta esté-

ril de 1 000 μ L. Las células despegadas por el daño mecánico fueron retiradas y se colocaron las distintas concentraciones experimentales de proteínas de mango disueltas en DMEM al 2 % de FBS, 1 % PE. Las células tratadas se compararon contra un control (células con herida, tratadas con medio de cultivo sin proteínas de mango). A las 24 h se llevó a cabo la fijación de las células y su tinción con la técnica de Cristal Violeta en todas las muestras, antes de fotografiarlas en campo claro con un microscopio EVOS FL (modelo L1113-178C-173, Thermo Scientific, W.A. United States). Se realizaron ensayos adicionales de cicatrización para evaluar el cierre de la herida a 24 y 48 horas mediante registro fotográfico en células vivas, sin fijación ni tinción. Las imágenes se obtuvieron en campo claro con el mismo equipo y se integraron en una figura comparativa, optimizada digitalmente para mejorar la nitidez y facilitar la evaluación morfológica. La distancia de la migración celular entre los bordes del área dañada mecánicamente de la monocapa se calculó utilizando el software EVOS® FL and FL color Cell Imaging Systems v.1.4 Rev 26059 (Grada y col., 2017).

La adquisición de datos consistió en dividir la herida en tres segmentos: superior, medio e inferior. Se realizaron al menos tres mediciones de la distancia entre los bordes de las tres áreas y se calculó la media. Para determinar el porcentaje (%) de contracción de la herida se aplicó la siguiente fórmula a las 24 h y 48 h (Sushanth y col., 2016).

$$\% \text{ Contracción de la herida} = \frac{\text{Área cicatrizada}}{\text{Área total de la herida}} \times 100$$

Análisis estadístico

Los resultados de la viabilidad celular y de la contracción de la herida fueron expresados como la media aritmética de tres repeticiones provenientes de tres experimentos independientes $\pm$ el error estándar (ES). La significancia estadística de la viabilidad se determinó realizando un análisis de varianza (ANOVA) de una vía con un intervalo de confianza del

95 %, seguido de un análisis *post-hoc* de Tukey, con nivel de $\alpha < 0.05$. En la variable contracción de la herida, los datos fueron expresados como la media $\pm$ ES. Se evaluó la diferencia de las micras de la lesión entre los tratamientos a lo largo de 0 h, 24 h y 48 h mediante la prueba de ANOVA de 2 vías de medidas repetidas. En caso de detectar significancia en los efectos principales, se reprogramó el análisis utilizando un ANOVA de una vía de medidas repetidas para el adecuado cálculo de los estadísticos. Las comparaciones múltiples se realizaron mediante la prueba de Bonferroni. El programa estadístico utilizado fue Graph Pad Prisma versión 8.2.1.

RESULTADOS

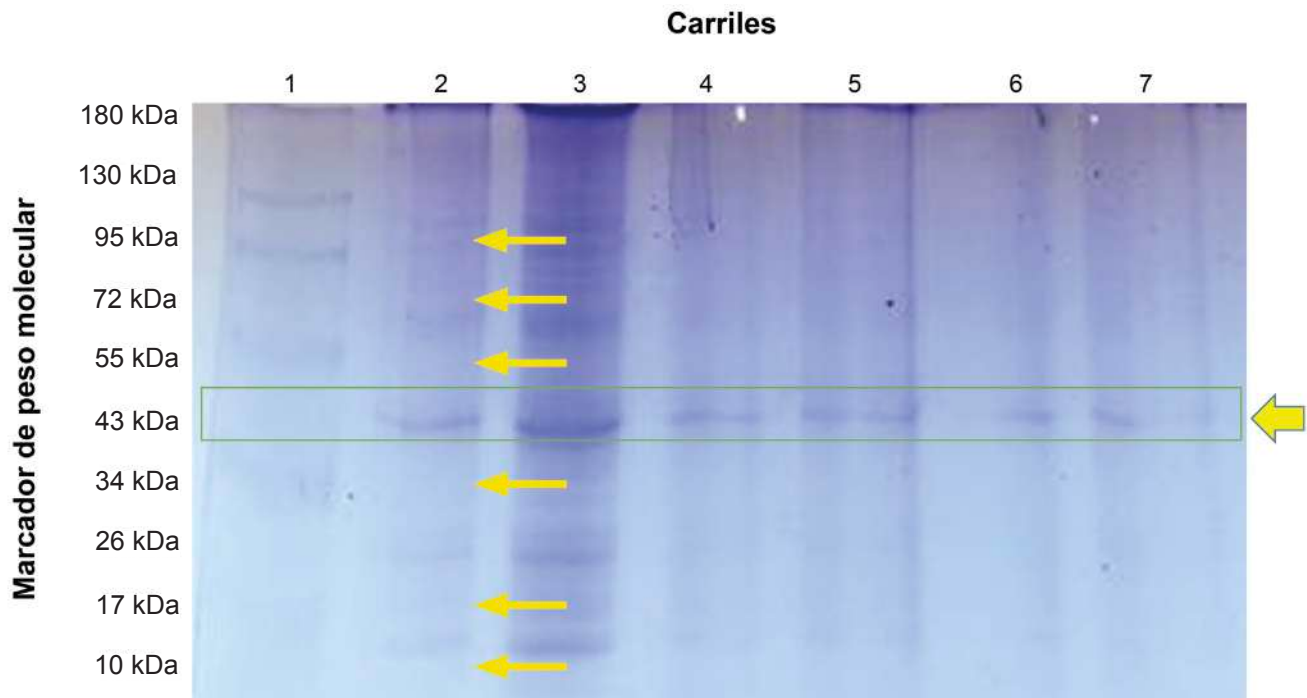
Caracterización del extracto proteico de mango

La muestra de pulpa de *Mangifera indica* analizada por electroforesis, tenía una concentración de proteínas de 10 μ g/ μ L, y mostró 7 bandas de proteínas, las cuales correspondieron a pesos moleculares de 10 kDa, 17 kDa, 30 kDa, 40 kDa, 55 kDa, 72 kDa y 95 kDa, con base en el marcador de peso molecular (Figura 1: carril 1). La banda de proteínas de 40 kDa mostró mayor intensidad en todos los carriles. Se observó una mayor cantidad de fracciones proteicas cuando la muestra se disolvió en el amortiguador Laemmli conteniendo β -mercaptoetanol (carril 3), que sin β -mercaptoetanol, ya que existe menor cantidad de fracciones proteicas, no obstante, la banda correspondiente a 40 kDa se identificó (Figura 1: carriles 2, 4, 5, 6 y 7).

Efecto del extracto de proteínas de mango en la viabilidad celular

Los ensayos de viabilidad no mostraron cambios morfológicos en los fibroblastos por efecto de los diferentes tratamientos con respecto al control, todos presentaban una morfología típica fusiforme y un índice alto de mitosis, comportamiento indicativo de no haber sufrido un efecto citotóxico al ser expuestos a las proteínas de mango (Patil y col., 2020).

Se observó un mayor porcentaje de viabilidad con las técnicas de centrifugación y filtración (Tabla 1), probablemente porque estos



■ Figura 1. Electroforesis de las proteínas de la pulpa de mango. Carril 1, marcador de peso molecular (10 kDa a 180 kDa). Carril 2, electroforesis de proteínas de mango resuspendidas en amortiguador de corrida Laemmli sin β -mercaptoetanol. Carril 3, proteínas de mango en amortiguador Laemmli con β -mercaptoetanol, Carriles 4 al 7; repeticiones de diferentes aislados de proteínas de mango en Laemmli sin β -mercaptoetanol.

Figure 1. Electrophoresis of mango pulp proteins. Lane 1, molecular weight marker (10 kDa to 180 kDa). Lane 2, electrophoresis of mango proteins resuspended in Laemmli buffer without β -mercaptoethanol. Lane 3, mango proteins in Laemmli buffer with β -mercaptoethanol, lanes 4 to 7; repeats of different mango protein isolates in Laemmli without β -mercaptoethanol.

■ Tabla 1. Efecto de la concentración de las proteínas de mango en la viabilidad de los fibroblastos a las 24 h en función del método de obtención.

Table 1. Effect of mango protein concentration on fibroblast viability at 24 hours according to the extraction method.

Concentración	Centrifugación %	Filtración %	Disueltas en DMSO %	Ultrafiltración %
Control	100 $\pm$ 0.00 ^a	100 $\pm$ 0.00 ^a	100 $\pm$ 0.00 ^a	100 $\pm$ 0.00 ^a
25 (μ g/mL)	115.4 $\pm$ 4.89 ^b	119.7 $\pm$ 3.60 ^b	89.49 $\pm$ 5.93 ^b	93.13 $\pm$ 1.73 ^b
2.5 (μ g/mL)	116.3 $\pm$ 2.35 ^b	135.4 $\pm$ 14.95 ^c	91.77 $\pm$ 5.25 ^b	98.50 $\pm$ 0.90 ^c
0.25 (μ g/mL)	125.1 $\pm$ 2.79 ^c	123.6 $\pm$ 3.99 ^b	89.79 $\pm$ 5.91 ^b	94.96 $\pm$ 0.09 ^b

^{a, b, c} Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos para un mismo método de obtención ($P < 0.05$). Los datos están expresados como la media $\pm$ error estándar al menos de 3 experimentos independientes.

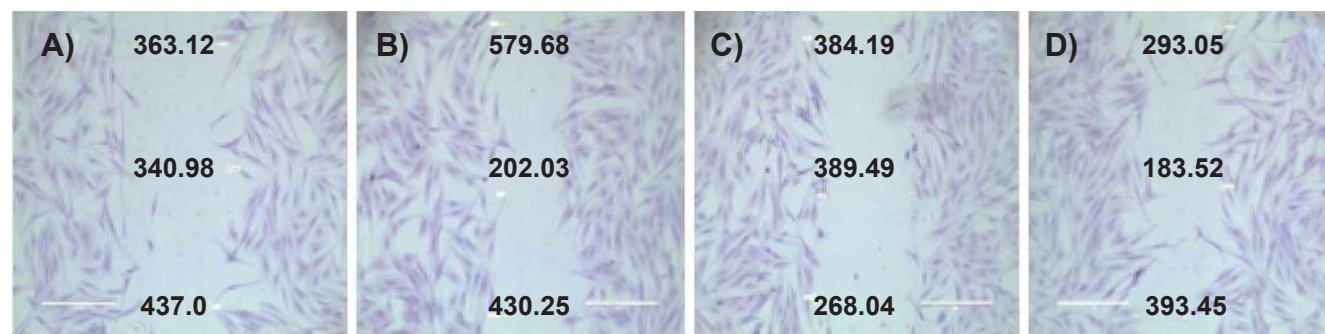
procedimientos retienen las proteínas de bajo peso molecular, como las lectinas, las cuales son mitogénicas permitiendo una mayor proliferación, y por lo tanto un porcentaje mayor de viabilidad (Fujii y col., 2024). Los fibroblastos de piel que estimularon con proteínas que se obtuvieron por centrifugación, mostraron un incremento en la viabilidad que varió de 15.40 % a 25.10 % por efecto de las diferentes concentraciones proteicas, comparado con el control. En el caso de la estimulación de fibroblastos con proteínas de mango obtenidas a través de la filtración, el incremento varió de 19.70 % a 35.45 %, comparado con el grupo de células control.

En contraste, las técnicas de obtención de proteínas utilizando DMSO y ultrafiltración indujeron un leve decremento en el porcentaje de viabilidad celular, probablemente asociado al DMSO y a la temperatura de incubación en el baño de agua, las cuales pueden desnaturalizar y agregar las proteínas de ba-

jo peso molecular (Pal y col., 2012), en tanto que la ultrafiltración podría impedir el paso de algunas proteínas de interés (Greening y Simpson, 2010). Sin embargo, el porcentaje de viabilidad fue superior al 50 % en ambos casos, lo que se considera aceptable (Wei y col., 2020). En los cultivos con las proteínas disueltas en DMSO, el decremento varió de 8.23 % a 10.51 %. En las proteínas que se obtuvieron por ultrafiltración, el decremento varió de 1.5 % a 6.87 % (Tabla 1). Basados en estos resultados, se utilizó el tratamiento de proteínas de mango por centrifugación para los ensayos de migración.

Efecto de las proteínas de mango sobre la migración celular de fibroblastos

En la Figura 2 se muestran los tratamientos en los que las células recibieron tratamiento previo con mitomicina C, que es un agente antineoplásico y antiproliferativo que reduce la formación de colágeno por los fibroblastos e impide la duplicación celular (Chen y



■ Figura 2. Ensayo herida-cicatriz con pretratamiento de mitomicina C a las 24 h. A) Control de fibroblasto sin estímulo, vehículo: DMEM 2 % SFB, 1 % PE (penicilina-estreptomicina). B) Fibroblastos + 25 µg/mL de proteínas de mango. C) Fibroblastos + 2.5 µg/mL de proteínas de mango, y D) Fibroblastos + 0.25 µg/mL de proteínas de mango. Determinación de la migración celular por microscopia de campo claro con microscopio invertido EVOS Flويد Thermo Scientific. Las imágenes son representativas de 1 a 3 campos de tres experimentos con diferentes pacientes. Objetivo de 10X. Células teñidas con colorante cristal violeta.

Figure 2. Wound-scar trial with pretreatment of mitomycin C. A) Control or fibroblasts without stimulation, vehicle: DMEM 2 % FBS, 1 % PS (penicilin-streptomycin). B) Fibroblasts + 25 µg/mL of mango proteins. C) Fibroblasts + 2.5 µg/mL of mango proteins, and D) Fibroblasts + 0.25 µg/mL of mango proteins. Determination of cell migration by brightfield microscopy in EVOS inverted microscope, Flويد Thermo Scientific. The images are representative of 1 to 3 fields and three independent experiments with different patients, target 10X. Cells stained with violet crystal dye.

col., 2006). El cultivo control presentó a las 24 h una tasa de cierre de herida de 25.78 %. En las muestras expuestas a proteínas de mango, el tratamiento de 2.5 µg/mL mostró el mayor porcentaje de cierre de herida (21.62 %), en comparación con los otros dos tratamientos: 25 µg/mL (12.00 %) y 0.25 µg/mL (13.65 %); pero ninguno de los tratamientos redujo significativamente el cierre de herida en comparación con el control.

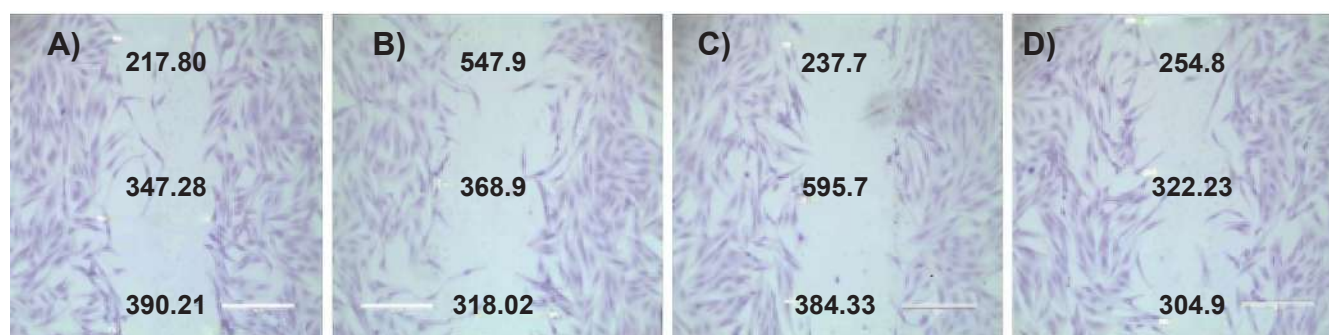
En la Figura 3 se muestran los fibroblastos que se sometieron a una prueba de raspado de la herida sin pretratamiento con mitomicina C. El tratamiento control mostró a las 24 h, un cierre de la herida del 22.15 %. En las células expuestas a proteínas de mango el cierre de herida varió de 6.29 % a 13.76 %.

La Figura 4 muestra el cierre de herida de manera inmediata a la realización de la herida (0 h) a las 24 h y 48 h, de los fibroblastos

pretratados con mitomicina C. Las muestras control presentaron 29 % de cierre de herida a las 24 h (Figura 4B) y de 33.6 % a las 48 h (Figura 4C). Las células expuestas a una concentración de 0.25 µg/mL mostraron la mayor tasa de cierre de herida (33 %) a las 24 h (Figuras 4J) y alcanzaron un 50.7 % a las 48 h (Figura 4L). La muestra con 2.5 µg/mL mostró la mayor tasa de cierre (61.6 %) a las 48 horas (Figura 4F).

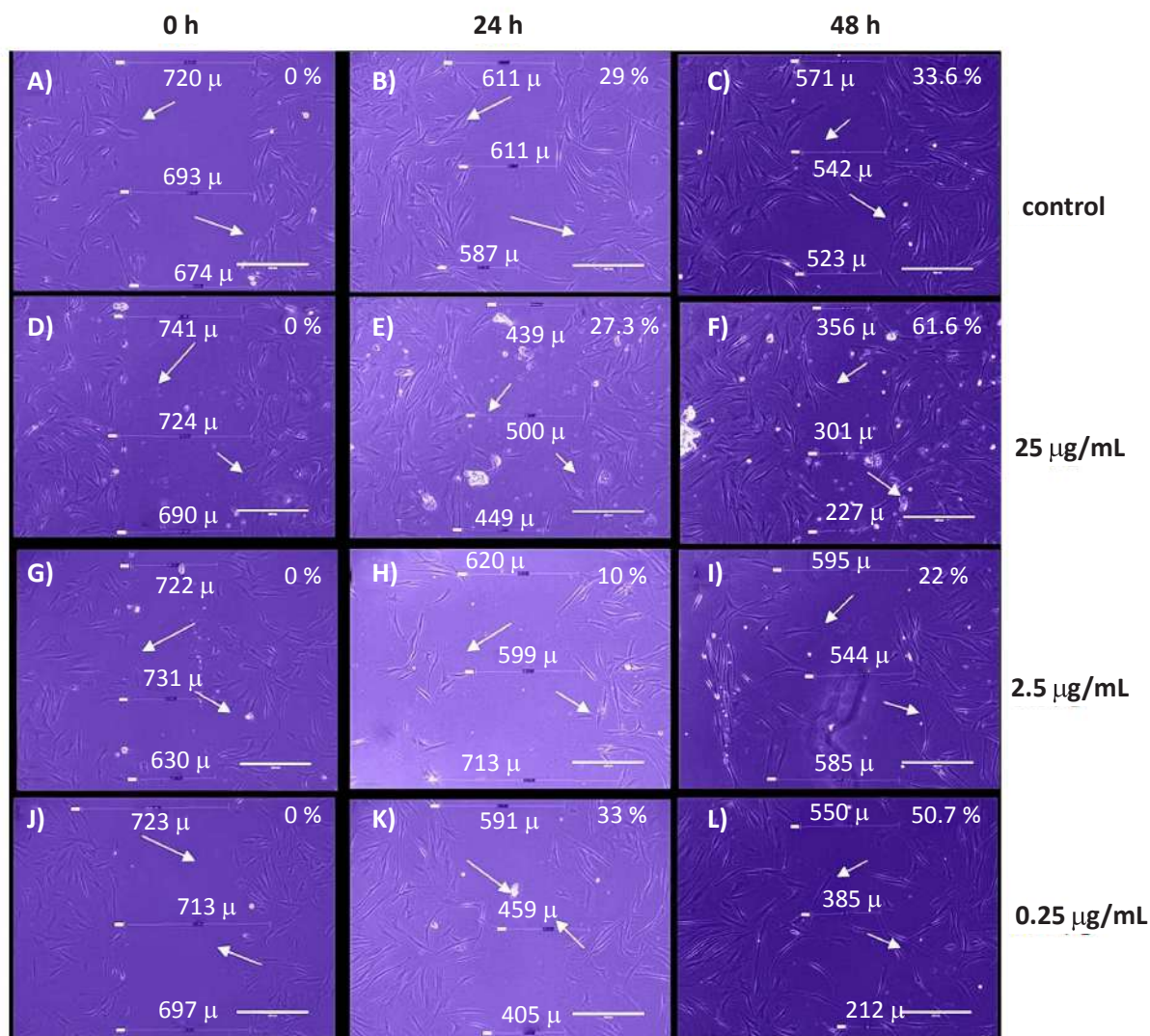
Análisis de la longitud de la herida en fibroblastos expuestos a proteínas de mango

El % de cierre a las 24 horas (Figura 5) fue significativamente mayor en la muestra con 0.25 µg/mL (38.06 %) indicando un mayor efecto respecto al control (27.11 %) y los otros dos tratamientos. Este porcentaje de cierre correspondió a una longitud de herida menor para la muestra tratada ($535.0 \pm 51.9 \mu\text{m}$) con relación al control ($526.33 \pm 7.9 \mu\text{m}$). Dicho comportamiento concordó con la tenden-



■ Figura 3. Ensayo herida-cicatriz sin pretratamiento de mitomicina C a las 24 h. A) Control de fibroblasto sin estímulo, vehículo: DMEM 2 % SFB, 1 % PE (penicilina-estreptomicina). B) Fibroblastos + 25 µg/mL de proteínas de mango. C) Fibroblastos + 2.5 µg/mL de proteínas de mango, y D) Fibroblastos + 0.25 µg/mL de proteínas de mango. Determinación de la migración celular por microscopia de campo claro con microscopio invertido EVOS Fluid Thermo Scientific. Las imágenes son representativas de 1 a 3 campos de tres experimentos con diferentes pacientes. Objetivo de 10X. Células teñidas con colorante cristal violeta.

Figure 3. Wound-scar trial without pretreatment of mitomycin C. A) Control or fibroblasts without stimulation, vehicle: DMEM 2 % FBS, 1 % PS (penicilin-streptomycin). B) Fibroblasts + 25 µg/mL of mango proteins. C) Fibroblasts + 2.5 µg/mL of mango proteins, and D) Fibroblasts + 0.25 µg/mL of mango proteins. Determination of cell migration by brightfield microscopy in EVOS inverted microscope, Fluid Thermo Scientific. The images are representative of 1 to 3 fields and three independent experiments with different patients, target 10X. Cells stained with violet crystal dye.



■ **Figura 4.** Comparación del cierre de herida en fibroblastos estimulados con proteínas de mango a diferentes concentraciones. A) Herida inicial del grupo control, B) 24 h y C) 48 h. D) Herida inicial en células expuestas a 25 μ g/mL de proteínas de mango. E) 24 h, F) 48 h. G) Herida inicial en fibroblastos con 2.5 μ g/mL de proteínas de mango. H) 24 h, I) 48 h. J) Herida inicial en células con 0.25 μ g/mL de proteínas de mango, K) 24 h y L) 48 h.

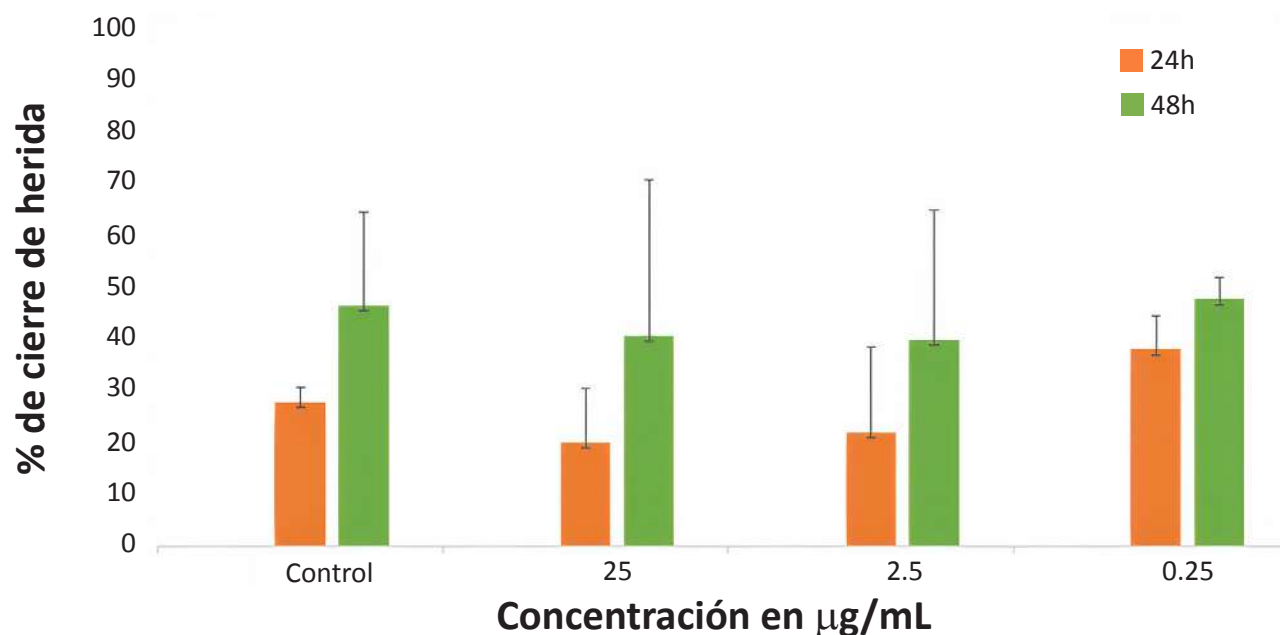
Figure 4. Comparison of wound closure in fibroblasts stimulated with varying concentrations of mango proteins. (A) Initial wound in the control group, followed by images at 24 h (B) and 48 h (C); (D) Initial wound in cells treated with 25 μ g/mL of mango proteins, with subsequent closure at 24 h (E) and 48 h (F); (G) Initial wound in cells treated with 2.5 μ g/mL, with closure assessed at 24 h (H) and 48 h (I); (J) Initial wound in cells treated with 0.25 μ g/mL, with closure observed at 24 h (K) and 48 h (L).

cia hacia una mayor migración celular presente en los cultivos que fueron estimulados con la concentración de 0.25 μ g/mL durante 24 h. La longitud de la herida fue más corta a las 48 h en todas las muestras, sin evidencia de una diferencia significativa por efecto de los tratamientos.

DISCUSIÓN

Caracterización del extracto proteico de mango

El patrón electroforético de las proteínas que se identificaron en el presente trabajo coincide con estudios previos de pulpa de mango. Herbert-Doctor y col. (2017) reportaron bandas de 250 kDa, 149 kDa, 75 kDa, 54 kDa,



■ Figura 5. Comparación de la longitud de la herida en porcentaje (%) entre el control y concentraciones de proteínas de mango. Los datos están mostrados como la media $\pm$ el error estándar de al menos 2 experimentos independientes, al inicio 0 h, 24 h y 48 h. El significado estadístico de la migración celular fue determinado realizando un ANOVA de una vía con intervalo de confianza del 95 %, seguido por un análisis *post-hoc* Tukey.

Figure 5. Comparison of wound length in porcentaje (%) between control and mango protein concentrations. The data is shown as the mean $\pm$ standard error (SE) of at least 2 independent experiments, at the beginning 0 h, 24 h y 48 h. The statistical significance of cell migration was determined by performing one-way ANOVA with a 95 % confidence interval, followed by a *post-hoc* Tukey analysis.

24 kDa, 18 kDa y 15 kDa. Así mismo, documentaron la presencia de bandas alrededor de 15 kDa, 30 kDa y 50 kDa. La banda de proteína alrededor de 30 kDa se ha atribuido a la actividad de las lectinas. Otros autores registraron bandas con peso molecular de 14 kDa, 16 kDa, 20 kDa, 25 kDa, 27 kDa, 30 kDa, 37 kDa, 40 kDa, 43 kDa, 50 kDa, 60 kDa y 70 kDa (Zhou y col., 2016). En donde la banda de 14 kDa pertenece a la familia de las profilinas (Wu y col., 2024). Algunas proteínas como Man i1 (40 kDa) y Man i2 (30 kDa) han sido identificadas como los principales alérgenos (Tsai y col., 2021), aunque la Man i1 de 40 kDa corresponde a la familia de gliceraldehido 3 fosfato deshidrogenasa (GAPDH), la cual está presente tanto en el reino animal como vegetal, por esto, es clasificada como una proteína multifuncional (Kopeckova y col., 2020).

Efecto del extracto de proteínas de mango en la viabilidad celular

Los resultados obtenidos indican que las proteínas aisladas de la pulpa de mango no fueron citotóxicas en ninguna de las dosis evaluadas, no afectaron la viabilidad de los fibroblastos, e incluso, en dosis altas, se identificó una tendencia a una mayor proliferación. Estos hallazgos difieren de lo reportado por Herbert-Doctor y col. (2017), quienes determinaron que el extracto de proteínas de mango presentó, además de un efecto proliferativo un efecto citotóxico, aunque evaluaron la proliferación utilizando concentraciones más bajas que las de este trabajo (0.771 µg/mL y 0.076 µg/mL). También reportaron que, altas concentraciones (3 804 µg/mL) y tiempos de exposición cortos mostraron un efecto citotóxico, a través de la activación de apoptosis y

para tiempos de estimulación prolongados necrosis.

Efecto de las proteínas de mango sobre la migración celular de fibroblastos

Las proteínas se han estudiado tradicionalmente en términos de función nutricional o como alérgenos (Zhou y col., 2016; Rajasekaran y Soundarapadian, 2023; Wu y col., 2024), pero estudiarlas por su efecto cicatrizante es reciente. Varias partes del árbol de mango han sido usadas para curar o tratar diversas condiciones, incluyendo las heridas (Suhatri y col., 2022), debido a que esta planta tiene propiedades antiinflamatorias, antioxidantes y antibacterianas, entre otras (Rajasekaran y Soundarapandian., 2023). Dichas propiedades pueden ser atribuidas al contenido de compuestos fitoquímicos, tales como polifenoles, terpenos, taninos, esteroides y carotenos (Quintana y col., 2021; Kumar y col., 2021; Suhatri y col., 2022).

En otro estudio, Pithayanukul y col. (2009) evaluaron el extracto etanólico de la semilla de mango, las cuales mostraron un efecto inhibitorio en la actividad caseinolítica y fibrinogenolítica del veneno de serpiente en necrosis tisular *in vitro*. Ellos también reportaron que el extracto de mango podría inhibir la actividad de metaloproteasas.

En cuanto a la migración celular, los resultados del estudio mostraron que las proteínas de la pulpa tienden a movilizar los fibroblastos en el cierre de la herida, con la concentración de 0.25 µg/mL mostrando el mejor resultado a las 48 h y favoreciendo la migración moderadamente (Espinosa-Espinosa y col., 2022). Los resultados con la dosis más pequeña, sugieren que a esta concentración las proteínas son más solubles y fueron difundidas con mayor facilidad a las células, aunque faltan realizar estudios que corroboren este mecanismo.

Uno de los mecanismos para llevar a cabo la movilización de los fibroblastos en la herida, podría ser a través de la formación de los fi-

lamentos de actina, los cuales son necesarios para la reestructuración del citoesqueleto y la formación de filopodios y lamelopodios que permiten a la célula moverse de un lugar a otro, un paso fundamental en la cicatrización de las heridas. Algunas proteínas tipo profilinas, encontradas en alimentos como el maíz, han reportado utilizar este mecanismo de migración (Gibbon y col., 1997). En este estudio, la proteína de 40 kDa, presente en el extracto proteico, probablemente tiene actividad GAPDH (Gliceraldehído-3-fosfato deshidrogenasa), lo que le permitiría interactuar con proteínas de la matriz extracelular (ECM, por sus siglas en inglés: extracellular matrix proteins) favoreciendo la adhesión de la fibronectina con la región transmembrana de integrina a través de receptores α y β . A través de este proceso, la cascada de señalización intracelular es activada causando un cambio en los filamentos de actina y miosina, por lo tanto, es necesario un reordenamiento del citoesqueleto de los fibroblastos para llevar a cabo la proliferación y migración (Tristan y col., 2011; Kopeckova y col., 2020), no obstante, una limitación del estudio fue la caracterización estructural de las fracciones proteicas.

Anteriormente GAPDH era considerada una proteína cuya función principal era la glicólisis. Sin embargo, se ha demostrado que participa en muchos procesos celulares, como la reparación del DNA, la exportación del RNA de transferencia, la fusión de membranas y transporte; también participa en la dinámica del citoesqueleto, así como en la muerte celular. Su actividad va a depender del estado de oligomerización y modificaciones post-traduccionales. GAPDH se localiza a nivel celular, ya sea en el citoplasma, vesículas, mitocondria, núcleo y membrana celular (Tristan y col., 2011). Cuando se localiza en la membrana sirve como receptor de los componentes de la ECM como la fibronectina, lamininas, fibrinógeno y plasminógeno (Kopeckova y col., 2020). Esto permite que se adhiera a las células interactuando con lisozimas, proteínas del citoesqueleto (actina y miosina), fibronectina,

vitronectina y plasminógeno (Wang y col., 2021). Cuando el GAPDH se localiza en el citoplasma, participa en la formación de microtúbulos debido a que interactúa con la tubulina y actina, promoviendo la polimerización de la actina (Tristan y col., 2011). Durante las etapas del proceso de cicatrización de heridas, los tejidos están en constante remodelación finalizando con el cierre de la herida (Tristan y col., 2011; Huerta y col., 2023) a través de la re-epitelización (Huerta y col., 2023).

Otra vía que pudiera estarse modulando a través de las proteínas del mango, es la activación de proteínas reguladoras de la familia Rho GTPasas, RhoA, Rac1 y Cdc42. Estas proteínas dirigen y regulan diversos procesos celulares como la citocinesis, la adhesión y la motilidad. Las GTPasas actúan como interruptores moleculares y activan la remodelación del citoesqueleto. Dicho proceso se lleva a cabo mediante la polimerización de actina y la formación de lamelipodios (Fu y col., 2022). La formación de estas estructuras requiere de factores que promuevan la nucleación, tales como, WAVE, WASP, WASH, WHAM y JMY, que activan el complejo Arp2/3, el cual es el responsable de la polimerización de actina, de la nucleación (Zheng y col., 2023) y de guiar la polaridad de la célula para el cierre de la herida (Fu y col., 2022).

Suraneni y col. (2012) demostraron la importancia del complejo Arp2/3 en una línea celular de fibroblastos que tenía inhibido el gen *Arpc3* (subunidad 3 del complejo Arp2/3). Cuando lo compararon con fibroblastos normales que expresaban *Arpc3* en un ensayo de cicatrización de herida, observaron que, en fibroblastos, sin la inhibición del gen, la herida se cerró a las 30 h. Por otro lado, en fibroblastos, con inhibición del gen, el cierre de herida se retrasó; las células no lograron extender los lamelipodios, pero generaron pequeños bordes como propulsiones en las membranas. Resulta interesante valorar el impacto de las proteínas de mango en estas vías. A la fecha, lo que se conoce es el potencial cicatr

trizante de un extracto acuoso de hojas de mango en un modelo *in vivo* con ratones blancos machos (*Mus musculus*), en el cual se demostró que la contracción de la herida fue mayor en los animales tratados con este extracto (Suhatri y col., 2022). En otro estudio del extracto crudo de hojas de mango, los autores reportaron que los componentes fitoquímicos como los taninos promueven el cierre de herida en un modelo de ratas de la cepa *Rattus norvegicus* (Nuevo y Bernardino, 2013). De la misma manera, se documentó que la combinación de miel y un extracto de pulpa de mango pulverizado influyeron en el cierre de la herida en un modelo *in vivo* utilizando ratones de Swiss. Este estudio demostró que el 100 % de cierre de la herida ocurrió después de 10 d (Sushanth y col., 2016).

En el caso de las proteínas de la pulpa de mango evaluadas en este estudio, mostraron un efecto moderado sobre la migración de fibroblastos en el cierre de herida. Por lo tanto, se sugiere realizar más estudios para verificar si las proteínas de mango ejercen un efecto citoprotector frente a mecanismos de daño en la piel. También, es conveniente caracterizar las diferentes proteínas involucradas usando técnicas como gel bidimensional y espectrofotometría de masas, con la finalidad de identificar su estructura, así como, realizar el análisis informático de las mismas. De esta manera será posible en un futuro su síntesis con fines farmacológicos (Delahunty y Yates, 2005; López-Macay y col., 2024).

CONCLUSIONES

Las proteínas de mango no mostraron un efecto citotóxico en los cultivos celulares, a las concentraciones empleadas, independientemente del método de preparación. Las técnicas de obtención mediante centrifugación y filtración indujeron un porcentaje mayor de viabilidad con respecto al control, asociado probablemente con una mayor retención de proteínas de bajo peso molecular, como las lectinas, las cuales son mitógenicas, permitiendo una mayor proliferación. Las técnicas de mezclado con DMSO y la de ultrafiltración

se asociaron con la disminución de la viabilidad celular. Las proteínas de mango favorecieron moderadamente la migración celular y se evidenció una disminución en la longitud de la herida, principalmente a las 24 h, por lo que sería recomendable realizar más estudios para establecer la concentración óptima para inducir la máxima eficiencia de cicatrización sin mostrar efecto citotóxico.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Roberto Sánchez Sánchez por el soporte técnico para el análisis

celular de este estudio y la donación de los fibroblastos humanos. Asimismo, a Liliana Ivonne Betancourt Trevedhan y Ricardo Tovar Miranda por su apoyo para la extracción proteica.

DECLARACIÓN DE INTERESES

Los autores declararon no tener conflicto de interés alguno.

REFERENCIAS

- Chen, T., Kunnavatana, S. S., & Koch, R. J. (2006). Effects of mitomycin-C on normal dermal fibroblasts. *The Laryngoscope*, 116(4), 514-517.
- Conejero, L., Higaki, Y., Baeza, M. L., Fernández, M., Varela-Nieto, I., & Zubeldia, J. M. (2007). Pollen-induced airway inflammation, hyper-responsiveness and apoptosis in a murine model of allergy. *Clinical & Experimental Allergy*, 37(3), 331-338. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2222.2007.02660.x>
- Delahunty, C. & Yates III, J. R. (2005). Protein identification using 2d-lc-ms/ms. *Methods*, 35(3), 248-255. <https://doi.org/10.1016/j.jymeth.2004.08.016>
- Espinosa-Espinosa, L., Garduño-Siciliano, L., Rodríguez-Canales, M., Hernández-Portilla, L. B., Canales-Martínez, M. M., & Rodríguez-Monroy, M. A. (2022). The wound-healing effect of mango peel extract on incision wounds in a murine model. *Molecules*, 27(1), 259.
- Fernández-Guarino, M., Hernández-Bule, M. L., & Bacci, S. (2023). Cellular and molecular processes in wound healing. *Biomedicine*, 11(9), 2526.
- Flick, D. A. & Gifford, G. E. (1984). Comparison of in vitro cell cytotoxic assays for tumor necrosis factor. *Journal of Immunological Methods*, 68(1-2), 167-175.
- Fu, J., Liu, B., Zhang, H., Fu, F., Yang, X., Fan, L., & Zhang, S. (2022). The role of cell division controls protein 42 in tumor and non-tumor diseases: a systematic review. *Journal of Cancer*, 13(3), 800-814. <https://doi.org/10.7150/jca.65415>
- Fujii, Y., Kamata, K., Gerdol, M., Hasan, I., Rajia, S., Kawsar, S. M., Padma, S., Chatterjee, B. P., Ohkawa, M., Ishiwata, R., Yoshimot, S., Yamada, M., Matsuzaki, N., Yamada, M., Yamamoto, K., Niimi, Y., Miyaniishi, N., Konno, M., ..., & Fujita, H. (2024). Multifunctional Cell Regulation Activities of the Mussel Lectin SeviL: Induction of Macrophage Polarization toward the M1 Functional Phenotype. *Marine Drugs*, 22(6), 269.
- Gibbon, C. B., Ren, H., & Staiger, J. C. (1997). Characterization of maize (*Zea mays*) pollen profilin function in vitro and in live cells. *Biochemical Journal*, 327(3), 909-915.
- Grada, A., Otero-Vinas, M., Prieto-Castrillo, F., Obagi, Z., & Falanga, V. (2017). Research techniques made simple: analysis of collective cell migration using the wound healing assay. *Journal of Investigative Dermatology*, 137(2), e11-e16. <https://doi.org/10.1016/J.JID.2016.11.020>
- Greening, D. W. & Simpson, R. J. (2010). A centrifugal ultrafiltration strategy for isolating the low-molecular weight (≤ 25 K) component of human plasma proteome. *Journal of Proteomics*, 73(3), 637-648. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2009.09.013>
- Gupta, S., Patel, L., Mitra, K., & Bit, A. (2022). Fibroblast Derived Skin Wound Healing Modeling on Chip under the Influence of Micro-Capillary Shear Stress. *Micromachines* 2022, 13(305), 1-22.
- Herbert-Doctor, L. A., Coutiño-Rodríguez, E. M. R., Palmeros-Sánchez, B., & Sampieri, R. C. L. (2017). Necrotic and Apoptotic Activity of the Protein Extract from Mesocarp in Human Lymphocytes in Culture. *ECORFAN-Bolivia Journal*, 4(6), 28-47.
- Hofmann, E., Fink, J., Pignet, A. L., Schwarz, A., Schellnegger, M., Nischwitz, S. P., & Kotzbeck, P. (2023). Human *In Vitro* Skin Models for Wound Healing and Wound Healing Disorders. *Biomedicine*

nes, 11(4), 1056. <https://doi.org/10.3390/biomedicines11041056>

Huerta, M., Franco-Serrano, L., Amela, I., Perez-Pons, J. A., Piñol, J., Mozo-Villarias, A., & Cedano, J. (2023). Role of moonlighting proteins in disease: analyzing the contribution of canonical and moonlighting functions in disease progression. *Cells*, 12(2), 235.

Kopeckova, M., Pavkova, I., & Stulik, J. (2020). Diverse localization and protein binding abilities of glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase in pathogenic bacteria: the key to its multifunctionality. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 10(89), 1-7. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2020.00089>

Krebs, A., Nyffeler, J., Rahnenführer, J., & Leist, M. (2018). Normalization of data for viability and relative cell function curves. *Alternatives to Animal Experimentation: ALTEX*, 35, 268-271. <https://doi.org/10.14573/1803231>

Kumar, M., Saurabh, V., Tomar, M., Hasan, M., Changan, S., Sasi, M., & Mekhemar, M. (2021). Mango (*Mangifera indica* L.) leaves: Nutritional composition, phytochemical profile, and health-promoting bioactivities. *Antioxidants*, 10(2), 299.

Lenucci, M. S., Tornese, R., Mita, G., & Durante, M. (2022). Bioactive compounds and antioxidant activities in different fractions of mango fruits (*Mangifera indica* L., cultivar Tommy Atkins and Keitt). *Antioxidants*, 11(3), 484: 1-21. <https://doi.org/10.3390/antiox11030484>

Lin, P., Zhang, G., & Li, H. (2023). The Role of Extracellular Matrix in Wound Healing. *Dermatologic Surgery*, 49(5S), S41-S48.

López-Macay, A., Montes-Sánchez, D., Narváez-Morales, J., Salas-Paniagua, M., Barrios-Aguilar, S., Zamudio-Cuevas, Y., Fernández-Torres, J. y Martínez, K. (2024). Explorando algunas técnicas proteómicas: Western blot, Dot blot y electroforesis bidimensional complementada con espectrometría de masas. *Investigación en Discapacidad*, 10(3), 187-202.

Marquínez, E. Y. L., Ortega, J. G., Morán, J. M., Campana, W. N. y Figueroa, T. F. (2023). Situación actual y perspectivas del cultivo de mango (*Mangifera indica* L.) en el Sur de Manabi, Ecuador. *Revista UNESUM-Ciencias*, 7(1), 156-172.

Nuevo, J. J. M. & Bernardino, E. R. K. (2013). The effect of *Mangifera indica* (Mango) leaf crude ex-

tract in the wound healing properties of *Rattus norvegicus* (Sprague Dawley). *Fatima University Research Journal*, 5(1), 1-1.

Ousey, K., Chadwick, P., Jawień, A., Tariq, G., Nair, H. K. R., Lázaro-Martínez, J. L., & Moore, Z. (2018). Identifying and treating foot ulcers in patients with diabetes: saving feet, legs and lives. *Journal of Wound Care*, 27(Sup5), S1-S52. <https://doi.org/10.12968/jowc.2018.27.Sup5.S1>

Patil, R., Kale, A. D., Mane, D. R., & Patil, D. (2020). Isolation, culture and characterization of primary cell lines of human buccal mucosal fibroblasts: A combination of explant enzymatic technique. *Journal of Oral and Maxillofacial Pathology*, 24(1), 68-75. https://doi.org/10.4103/jomfp.JOMFP_282_19

Pal, R., Mamidi, M. K., Das, A. K., & Bhonde, R. (2012). Diverse effects of dimethyl sulfoxide (DMSO) on the differentiation potential of human embryonic stem cells. *Archives of Toxicology*, 86, 651-661

Pithayanukul, P., Leanpolchareanchai, J., & Sarpapakorn, P. (2009). Molecular docking studies and anti- snake venom metalloproteinase activity of Thai mango seed kernel extract. *Molecules*, 14(9), 3198-3213. <https://doi.org/10.3390/molecules14093198>

Punjataewakupt, A., Napavichayanun, S., & Aramwit, P. (2019). The downside of antimicrobial agents for wound healing. *European Journal of Clinical Microbiology & Infectious Diseases*, 38, 39-54.

Quintana, S. E., Salas, S., & García-Zapateiro, L. A. (2021). Bioactive compounds of mango (*Mangifera indica*): A review of extraction technologies and chemical constituents. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(15), 6186-6192. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1145>

Rajasekaran, A. & Soundarapandian, S. (2023). Nutritional and medicinal values of *Mangifera indica* L. fruit. *Trends in Horticulture*, 6(2), 1-12. <https://doi.org/10.24294/th.v6i2.2949>

Raziyeva, K., Kim, Y., Zharkinbekov, Z., Kassymbek, K., Jimi, S., & Saparov, A. (2021). Immunology of acute and chronic wound healing. *Biomolecules*, 11(5), 1-25. <https://doi.org/10.3390/biom11050700>

Shah, K. A., Patel, M. B., Patel, R. J., & Parmar, P. K. (2010). *Mangifera indica* (mango). *Pharmacognosy Reviews*, 4(7), 42-48. <https://doi.org/10.4103/0973-7847.65325>

Suhatri, S., Fidiyani, D., Azzahra, N., & Suardi, M. (2022). Effectiveness of Mango Leaf Extract (*Mangifera indica* L.) on Healing of Second Level Cut

Wound in Male White Mice (*Mus musculus*). *Journal Kesehatan Terapan*, 9(2), 7-12. <https://doi.org/10.54816/jk.v9i2.520>

Suraneni, P., Rubinstein, B., Unruh, J. R., Durnin, M., Hanein, D., & Li, R. (2012). The Arp2/3 complex is required for lamellipodia extension and directional fibroblast cell migration. *Journal of Cell Biology*, 197(2), 239-251. <https://doi.org/10.1083/jcb.201112113>

Sushanth, K. A., Lakshmi, K. C., & Reddy, D. S. (2016). Evaluation of wound healing activity with a new formulation of dry *Mangifera indica* and honey using swiss albino mice. *Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*, 139-142.

Tristan, C., Shahani, N., Sedlak, T. W., & Sawa, A. (2011). The diverse functions of GAPDH: views from different subcellular compartments. *Cellular Signalling*, 23(2), 317-323.

Tsai, W. C., Yin, H. Y., Chen, S. N., Chang, H. C., & Wen, H. W. (2021). Development of monoclonal antibody-based sandwich ELISA for detecting major mango allergen Man i1 in processed foods. *Journal of Food Safety*, 41(2), e12884.

Wang, J., Li, Y., Pan, L., Li, J., Yu, Y., Liu, B., & Xiong, Q. (2021). Glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase (GAPDH) moonlights as an adhesin in *Mycoplasma hyorhinis* adhesion to epithelial cells as well as a plasminogen receptor mediating extracellular matrix degradation. *Veterinary Research*, 52(1), 1-14. <https://doi.org/10.1186/s13567-021-00952-8>

Wei, F., Zhao, L., & Jing, Y. (2020). Mechanisms underlying dimethyl sulfoxide-induced cellular migration in human normal hepatic cells. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 80, 103489.

Wu, C. C., Lin, C. C., Yin, H. Y., Tsai, W. C., Yang, P. F., Liu, H. J., & Wen, H. W. (2024). Rapid detection of mango allergen in processed foods using an immunomagnetic nanoparticle-based electrochemical immunosensor. *Microchemical Journal*, 1100, 1-16.

Zheng, S., Qin, F., Yin, J., Li, D., Huang, Y., Hu, L., & Hu, W. (2023). Role and mechanism of actin-related protein 2/3 complex signaling in cancer invasion and metastasis: A review. *Medicine*, 102(14), 1-8.

Zhou, C., Ludmila, T., Sun, N., Wang, C., Pu, Q., Huang, K., & Che, H. (2016). BALB/c mice can be used to evaluate allergenicity of different food protein extracts. *Food and Agricultural Immunology*, 27(5), 589-603.



Bienestar psicológico y resiliencia en el profesorado de educación básica: correlación con la edad y diferencias según sexo y dependencia educacional en Chile

Psychological well-being and resilience in elementary school teachers: correlation with age and differences according to sex and educational dependency in Chile

Valentina Belén Concha-Herrera¹, Fabiola Sáez-Delgado¹, Oscar Ulises Reynoso-González^{2*}, Javier Mella-Norambuena³

RESUMEN

El bienestar psicológico y la resiliencia son factores clave en el desempeño del profesorado, por influir en su capacidad para afrontar los desafíos del entorno educativo. El objetivo del presente estudio fue analizar la relación entre el bienestar psicológico y la resiliencia en docentes chilenos de educación básica, considerando diferencias por sexo y tipo de institución educativa. Se utilizó un diseño cuantitativo, no experimental y transversal, con una muestra de 385 docentes. Se aplicaron la Escala de Bienestar Psicológico de Ryff y la Escala de Resiliencia Cotidiana para estudiantes y personal docente. Se determinó la diferencia en niveles de bienestar psicológico y resiliencia en función del sexo y dependencia educacional mediante la prueba robusta de Yuen. Se realizó un análisis correlacional de Spearman entre ambas variables y las dimensiones de bienestar psicológico. La mayoría de los docentes presentaron valores por encima del nivel medio en las dos escalas evaluadas. El bienestar psicológico se ubicó en nivel bajo en 11.2 % de los profesores y el de resiliencia en 20.26 %. Todas las dimensiones de bienestar psicológico mostraron correlaciones significativas y positivas con la resiliencia, la mayor asociación se observó con autoaceptación ($Rho = 0.61$), autonomía ($Rho = 0.59$) y dominio del entorno ($Rho = 0.54$). La edad no mostró correlación significativa con ninguno de los parámetros evaluados. El bienestar psicológico fue mayor en las mujeres ($P < 0.05$) con puntuaciones más altas en las dimensiones de relaciones positivas y crecimiento personal. No se encontraron diferencias ($P > 0.05$) por tipo de dependencia educacional entre profesores del mismo sexo para ambos tipos de instituciones. Es importante fomentar la resiliencia del profesorado para mejorar su bienestar psicológico, independientemente de la edad o el contexto institucional. Implementar programas de apoyo emocional y capacitación en estrategias resilientes permitiría promover un entorno educativo más saludable.

PALABRAS CLAVE: bienestar psicológico, resiliencia docente, educación escolar, diferencias de género, instituciones educativas.

ABSTRACT

Psychological well-being and resilience are key factors in teachers' performance, as they influence their ability to cope with the challenges of the educational environment. The aim of this study was to analyze the relationship between psychological well-being and resilience in Chilean elementary school teachers, considering differences by sex and type of educational institution. A quantitative, non-experimental, cross-sectional design was used, with a sample of 385 teachers. The Ryff Psychological Well-Being Scale and the Academic Buoyancy Scale for students and teaching staff were administered. Differences in the levels of psychological well-being and resilience by sex and educational dependency were determined using the robust Yuen test. A Spearman correlation analysis was conducted between both variables and the dimensions of psychological well-being. Most teachers scored above the medium level on both scales evaluated. Psychological well-being was at a low level in 11.2 % of teachers, and resilience in 20.26 %. All dimensions of psychological well-being showed significant and positive correlations with resilience, with the strongest associations observed with self-acceptance ($Rho = 0.61$), autonomy ($Rho = 0.59$), and environmental mastery ($Rho = 0.54$). Age did not show significant correlations with any of the evaluated parameters. Psychological well-being was higher among women ($P < 0.05$), with higher scores in the dimensions of positive relations and personal growth. No significant differences ($P > 0.05$) were found by type of educational dependency among teachers of the same sex. It is important to foster teachers' resilience to improve their psychological well-being, regardless of age or institutional context. Implementing emotional support programs and training in resilient strategies may help promote a healthier educational environment.

KEYWORDS: psychological well-being, teacher resilience, school education, gender differences, educational institutions.

*Correspondencia: ulises.reynoso@academicos.udg.mx/Fecha de recepción: 22 de enero de 2025/Fecha de aceptación: 17 de junio de 2025/Fecha de publicación: 27 de junio de 2025.

¹Universidad Católica de la Santísima Concepción, Facultad de Educación, Departamento de Fundamentos de la Pedagogía, Concepción, Biobío, Chile, C. P. 4070129. ²Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Los Altos, Departamento de Ciencias de la Salud, Av. Rafael Casillas Aceves núm. 1200, Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México, C. P. 47620. ³Universidad de Las Américas, Facultad de Salud y Ciencias Sociales, Concepción, Biobío, Chile, C. P. 4100000.

INTRODUCCIÓN

El bienestar psicológico y la resiliencia del profesorado han cobrado relevancia creciente en las últimas décadas en América Latina, donde los docentes enfrentan múltiples desafíos que inciden en su experiencia profesional y en su capacidad de adaptación (López-Angulo y col., 2022). Factores como la violencia escolar, las altas exigencias institucionales y los efectos persistentes de la pandemia del COVID-19 han incrementado los niveles de estrés y desgaste profesional (Superintendencia de Educación, 2023; Sáez-Delgado y col., 2023a). Dicho fenómeno no es aislado, sino que se inscribe en una tendencia global que resalta la necesidad de abordar el bienestar del docente como un elemento crucial para la calidad educativa (Ramos-Huenteo y col., 2020). En este contexto, el bienestar psicológico y la resiliencia emergen como variables clave. Ryff y Keyes (1995) propusieron un modelo de bienestar psicológico que abarca dimensiones esenciales como la autoaceptación, las relaciones positivas con otros, la autonomía, el dominio del entorno, el propósito de vida y el crecimiento personal. Estas dimensiones, según investigaciones previas, son determinantes para el desempeño docente, ya que inciden en su satisfacción laboral y en su capacidad para generar un ambiente de aprendizaje óptimo (De-Cordova y col., 2019; Consejo de la Unión Europea, 2020). Por su parte, la resiliencia, definida como la capacidad de adaptarse y superar situaciones adversas, actúa como un amortiguador frente al estrés y la sobrecarga laboral (Papatraianou y col., 2018; Vicente-de-Vera y Gambarte, 2019).

El estado del arte, en torno al bienestar psicológico y la resiliencia en el profesorado, evidencia tanto avances como vacíos en la literatura. Estudios internacionales destacan que las mujeres tienden a puntuar más alto en dimensiones como relaciones interpersonales y crecimiento personal, mientras que los hombres sobresalen en dominio del entorno y resiliencia (Ryff y Keyes, 1995; Akram, 2019; Saldarriaga y col., 2022). En Chile, Villalobos y Asaél (2018) subrayaron la escasez de investiga-

ciones que abordan estas variables desde una perspectiva integral. Además, durante la pandemia, el profesorado enfrentó un incremento en experiencias asociadas al malestar emocional y al agotamiento profesional, tales como ansiedad, desmotivación y síntomas de burnout (Ramos y col., 2023). Según Sáez-Delgado y col. (2023a), la inteligencia emocional juega un papel mediador frente a estas condiciones, aunque en muchos casos su desarrollo sigue siendo limitado.

Pese a los avances que se han reportado en los temas investigados, persisten brechas significativas. La mayoría de los estudios se centran en la relación entre bienestar y resiliencia, pero pocos analizan cómo estas variables interactúan con factores sociodemográficos como el sexo y la dependencia educacional. Asimismo, la relación entre el bienestar psicológico y la resiliencia con la edad del profesorado sigue siendo un área poco explorada, aunque investigaciones preliminares indican que dimensiones como la autonomía y el dominio del entorno tienden a estabilizarse con el tiempo (Mayordomo y col., 2016). Además, diversas investigaciones han evidenciado que, cuando el profesorado posee competencias transversales bien desarrolladas en su práctica docente, estas se reflejan en sus estudiantes, generando una reciprocidad en el fortalecimiento de dichas competencias en el alumnado (Pérez-Salas y col., 2021; Sáez-Delgado y col., 2022).

Por otro lado, la violencia escolar, un tema recurrente en Latinoamérica, tiene un impacto directo en el clima de aula y en las condiciones psicoemocionales del profesorado. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, por sus siglas en inglés: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) (UNESCO, 2021; 2024), este problema afecta tanto el rendimiento académico como el bienestar general de estudiantes y educadores. En Chile, la Superintendencia de Educación (2023) reportó más de 4 500 denuncias por maltrato entre estudiantes en 2023,

situándose como la segunda cifra más alta en una década. Este clima adverso no solo incrementa el estrés laboral, sino que también contribuye al abandono de la profesión (el tema de las remuneraciones, la insatisfacción laboral y la desprofesionalización), un fenómeno que en el país resulta preocupante (Gaete y col., 2017).

El objetivo de este estudio fue analizar los niveles de bienestar psicológico y la resiliencia del profesorado de educación básica, así como su relación con la edad, además de establecer diferencias según el sexo y la dependencia educacional en la región del Biobío, Chile.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se adscribe a un enfoque cuantitativo bajo el paradigma positivista, con un diseño no experimental, transversal y de alcance descriptivo-correlacional (Hernández y col., 2014).

Participantes

La muestra estuvo compuesta por 385 docentes de nivel de educación básica en la región del Biobío, Chile, seleccionados mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia. Los participantes cumplían con los siguientes criterios de inclusión: ser docentes titulados, trabajar en establecimientos públicos o subvencionados de la región (establecimientos que se financian con aportes del Estado y de los padres, madres y apoderados, a través del pago de una mensualidad (Mineduc, 2025), y tener nacionalidad chilena. Se excluyeron docentes de instituciones particulares o de otras regiones, así también profesionales que apoyan la labor docente como asistentes de la educación, pero que no poseen un título profesional de profesor/a.

Bienestar psicológico

Se utilizó la Escala de bienestar psicológico de Ryff, en su versión adaptada al contexto chileno por Díaz y col. (2006), constituida por 29 ítems, y que evalúa el bienestar psicológico a través de 6 dimensiones: autoaceptación, relaciones positivas con otros, autonomía, do-

minio del entorno, propósito de vida y crecimiento personal. Cada dimensión consta de 4 a 6 ítems, puntuados en una escala Likert de 1 (totalmente en desacuerdo) a 7 (totalmente de acuerdo). Para darse una idea de la escala se muestra un ejemplo de cada dimensión: autoaceptación, “En su mayor parte, me siento orgulloso de quien soy y la vida que llevo”; relaciones positivas con otros, “Sé que puedo confiar en mis amigos, y ellos saben que pueden confiar en mí”; autonomía, “No tengo miedo de expresar mis opiniones, incluso cuando son opuestas a las opiniones de la mayoría de la gente”; dominio del entorno, “En general, siento que soy responsable de la situación en la que vivo”; propósito de vida, “Disfruto haciendo planes para el futuro y trabajar para hacerlos realidad”; crecimiento personal, “Para mí, la vida ha sido un proceso continuo de estudio, cambio y crecimiento”. La escala de Ryff no establece puntos de corte normativos; sin embargo, para fines interpretativos, en este estudio, se adoptó una clasificación de los puntajes basada en rangos: valores entre 1 y 3 se consideraron indicativos de un nivel bajo de bienestar psicológico, de 4 a 5 como nivel medio, y de 6 a 7 como nivel alto. Dicha segmentación permitió analizar la distribución de los niveles de bienestar en la muestra de forma más detallada.

Resiliencia

Se utilizó la escala de resiliencia cotidiana, desarrollada específicamente para medir la capacidad de enfrentar situaciones de estrés y presión de estudiantes y personal docente (Martin y Marsh, 2008). Consta de 4 ítems que evalúan aspectos como la gestión del estrés laboral y la recuperación frente a contratiempo. Para la interpretación de la escala se consideró su gradación correspondiente a una escala Likert de 7 puntos donde: Totalmente en desacuerdo (1), En desacuerdo (2), Algo en desacuerdo (3), Ni de acuerdo ni en desacuerdo (4), Algo de acuerdo (5), De acuerdo (6), Totalmente de acuerdo (7). Dado que no se identificó una versión oficial en español del instrumento original de Martin y

Marsh (2008), se llevó a cabo un proceso de traducción y adaptación cultural para su aplicación en el presente estudio. Este proceso siguió las recomendaciones internacionales para la adaptación de instrumentos psicométricos (Muñiz y col., 2013), e incluyó una traducción directa de los ítems del inglés al español por parte de dos expertos bilingües en psicología educativa, seguida de una retrotraducción independiente al inglés por otro traductor con dominio académico del idioma. Las versiones fueron comparadas para asegurar la equivalencia semántica y conceptual de los ítems, realizando ajustes menores cuando fue necesario. Posteriormente, se evaluó la claridad y adecuación cultural del instrumento mediante una prueba piloto con un grupo de 15 profesores con características similares a la muestra objetivo. Este procedimiento permitió garantizar la validez de contenido y la comprensión contextual de los ítems, lo cual justifica el uso del instrumento traducido en el presente estudio (Tabla 1). Para su análisis, se aplicó la misma clasificación de puntuaciones empleada en la escala de bienestar psicológico, considerando como nivel bajo los puntajes entre 1 y 3, nivel medio entre 4 y 5, y nivel alto entre 6 y 7. Esta segmentación facilitó una interpretación más precisa de los niveles de resiliencia en el profesorado.

Procedimiento

El proceso de investigación se llevó a cabo en varias etapas que incluyeron desde el contacto inicial con personal de los lugares edu-

cativos hasta la recolección y análisis de los datos. En primer lugar, se estableció comunicación con los directores de los siete colegios seleccionados por conveniencia, a quienes se les presentó una carta institucional detallando los objetivos y alcances del estudio, solicitando su autorización para la aplicación de los instrumentos. Todos los colegios aceptaron participar. Una vez obtenidos los permisos, se distribuyó un consentimiento informado a los docentes, explicando la finalidad de la investigación, asegurando la confidencialidad de los datos y destacando la voluntariedad de su participación. Los docentes que aceptaron firmaron el documento. Posteriormente, se procedió a la aplicación de las escalas, que se realizó tanto de manera presencial como virtual, utilizando códigos QR y formatos impresos según las preferencias de los participantes. El tiempo promedio de respuesta varió de 10 min a 15 min. Los datos fueron recolectados y almacenados mediante un sistema de codificación realizado por los autores, que permitió mantener el anonimato de los participantes. El trabajo de campo se realizó en el primer semestre del 2024.

Consideraciones éticas

Este estudio cumplió con los principios éticos establecidos por la Declaración de Helsinki y las normativas éticas nacionales. Se garantizó el anonimato y la confidencialidad de los participantes, quienes fueron enterados de su derecho a retirarse del estudio en

■ Tabla 1. Ítems traducidos de la Escala de Resiliencia Cotidiana.
Table 1. Translated Items from the Daily Resilience Scale..

N	Ítem original	Traducción
1	I don't let work stress get on top of me.	No dejo que el estrés laboral me supere.
2	I think I'm good at dealing with work pressures.	Creo que soy bueno afrontando las presiones del trabajo.
3	I don't let a bad performance or outcome at work affect my confidence.	No dejo que un mal rendimiento o resultado en el trabajo afecte a mi confianza.
4	I'm good at dealing with setbacks at work (e.g., poor performance, negative feedback).	Se me da bien afrontar los contratiempos en el trabajo (por ejemplo, mal rendimiento, comentarios negativos).

cualquier momento sin repercusiones. El protocolo de investigación fue aprobado por el comité ético de la Universidad de la autora principal, asegurando el cumplimiento de los estándares éticos. El estudio fue aprobado por el comité de ética y bioética de la Universidad Católica de la Santísima Concepción bajo el registro ORD.N°16/2024.

Análisis de datos

Se llevaron a cabo análisis descriptivos para caracterizar las variables principales, incluyendo medidas de tendencia central y dispersión. Además, se realizaron análisis correlacionales de Spearman para explorar la relación entre bienestar psicológico, resiliencia y edad. Para los objetivos que implicaban comparaciones por sexo y dependencia educacional, se aplicaron pruebas no paramétricas, incluyendo la prueba robusta de Yuen con una tasa de recorte del 20 %, dado que las pruebas de normalidad revelaron distribuciones no normales en la mayoría de las variables. Los datos fueron analizados utilizando el software estadístico R. versión 4.3.2.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La edad promedio de los docentes fue de 39.16 años (DE = 9.52), con una mayor representación femenina (82.0 %) respecto a la masculina (18.0 %). En cuanto a la dependencia educacional, el 54.0 % de los participantes laboraban en establecimientos subvencionados, mientras que el 46.0 % lo hacía en instituciones públicas (Tabla 2).

Atendiendo las medidas de tendencia central, (Tabla 3) la dimensión con mayor puntuación

fue el crecimiento personal ($M = 5.77$, $DE = 1.24$), lo cual resulta consistente con estudios que han señalado esta área como una de las más fortalecidas dentro del bienestar psicológico, al representar la capacidad de desarrollarse, aprender y transformarse a lo largo de la vida (Díaz y col., 2006; Mayordomo y col., 2016). Le siguió en puntuación la dimensión de autonomía ($M = 5.62$, $DE = 1.30$), lo que concuerda con investigaciones previas que destacan este aspecto como un pilar central del ejercicio docente (Ávila, 2019). En contraste, la puntuación más baja se observó en propósito de vida ($M = 4.71$, $DE = 1.25$), hallazgo que puede estar vinculado a factores institucionales que dificultan la proyección personal y profesional, tal como lo advierten diversos estudios en contextos educativos similares (Véliz, 2012).

La resiliencia, evaluada mediante la escala de Martín y Marsh (2008), presentó adecuados niveles de consistencia interna ($\alpha = 0.82$) de acuerdo con Abad y col. (2011). Además, su promedio mostró un nivel moderado en la muestra ($M = 4.97$, $DE = 1.45$) (Tabla 3), lo cual coincide con hallazgos previos en población docente (Vera y col., 2015; Turan, 2021). Este resultado refuerza el papel de la resiliencia como un mecanismo de protección frente a las demandas del entorno escolar, tal como lo señalan Papatraianou y col. (2018) y Vicente-de-Vera y Gambarte (2019).

En cuanto a la distribución del profesorado por niveles de bienestar psicológico (Tabla 4), la mayoría de ellos se concentró en el nivel medio de bienestar psicológico (58.9 %),

■ Tabla 2. Distribución de la muestra según tipo de establecimiento educativo y sexo.

Table 2. Distribution of the sample by type of educational institution and gender.

Establecimiento educativo	Hombres		Mujeres		Total
	n	%	n	%	
Subvencionados	33	18.64	144	81.36	177 [46.0 %]
Público	36	17.31	172	82.69	208 [54.0 %]
Total	69	17.92	316	82.08	385 [100.0 %]

■ **Tabla 3. Análisis descriptivo de las variables de estudio.**
 Table 3. Descriptive analysis of the study variables.

Variables	M	Me	DE	Min-Max	Rango	Asimetría	Curtosis	K-S ^a
Resiliencia	4.97	5.25	1.45	1 a 7	6.00	- 0.82	0.03	0.091*
Bienestar psicológico	5.33	5.50	1.09	1 a 7	6.00	-1.09	1.00	0.109*
Autoaceptación	5.61	6.00	1.29	1 a 7	6.00	- 1.41	1.55	0.091*
Relaciones positivas	5.13	5.40	1.43	1 a 7	6.00	- 0.63	- 0.34	0.178*
Autonomía	5.62	6.00	1.30	1.50 a 7	5.50	- 1.57	2.01	0.102*
Dominio del entorno	5.19	5.40	1.20	1.80 a 7	5.20	- 0.71	0.16	0.172*
Propósito de vida	4.71	4.80	1.25	1 a 7	6.00	- 0.23	- 0.35	0.085*
Crecimiento personal	5.77	6.00	1.24	1.25 a 7	5.75	- 1.41	1.74	0.057*

*Indica la existencia de diferencia significativa (P < 0.05).
^aPrueba de Kolmogorov-Smirnov con la corrección de Lilliefors. Indica que la distribución se aleja de la normalidad.

■ **Tabla 4. Distribución de los niveles de Bienestar por tipo de institución y sexo.**
 Table 4. Distribution of Well-Being Levels by Type of Institution and Gender.

Puntos en la escala	Subvencionados						Públicos					
	Hombres		Mujeres		Total		Hombres		Mujeres		Total	
	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
1 a 3	2	6.06	19	13.19	21	11.86	8	22.22	14	8.14	22	10.58
4 a 5	19	57.58	85	59.03	104	58.76	19	52.78	104	60.47	123	59.13
6 a 7	12	36.36	40	27.78	52	29.38	9	25.00	54	31.40	63	30.29
Total	33	100	144	100	177	100	36	100	172	100	208	100

seguido por nivel alto (29.9%) y una menor proporción en nivel bajo (11.2 %). Respecto al tipo de institución, de acuerdo a la distribución por niveles según la escala de bienestar psicológico, la mayoría de los docentes de establecimientos subvencionados (57.58 % hombres y 59.03 % mujeres) se encontraban en el nivel medio (4 a 5); mientras que con una proporción ligeramente mayor que los hombres (6.06 %) se ubicaron las mujeres (13.19 %) en el nivel bajo (1 a 3). En los establecimientos públicos también predominó el rango medio con 52.78 % para los hombres y 60.47 % para las mujeres. Sin embargo, los hombres tuvieron una proporción mayor (22.22 %) en el rango bajo en compara-

ción con las mujeres (8.14 %). Estos resultados indican un adecuado bienestar psicológico para la mayoría de la población, pero los profesores varones que laboraban en establecimientos públicos mostraron una mayor tendencia al rango bajo en comparación con otros grupos, mientras que las mujeres en establecimientos públicos tuvieron una mayor representación en el nivel alto (6 a 7).

La distribución por niveles según la escala de resiliencia (Tabla 5) presentó la misma tendencia que la escala de bienestar psicológico, con una concentración mayor en el nivel medio (49.09 %), seguida del alto (30.65 %) y en menor proporción del bajo (20.26 %). Sin

■ **Tabla 5. Distribución de los niveles de Resiliencia por tipo de institución y sexo.**
Table 5. Distribution of Resilience Levels by Type of Institution and Gender.

Puntos en la escala	Subvencionados						Públicos					
	Hombres		Mujeres		Total		Hombres		Mujeres		Total	
	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
1 a 3	3	9.09	36	25.00	39	22.03	7	19.44	32	18.60	39	18.75
4 a 5	13	39.39	60	41.67	73	41.24	19	52.78	97	56.40	116	55.77
6 a 7	17	51.52	48	33.33	65	36.72	10	27.78	43	25.00	53	25.48
Total	33	100	144	100	177	100	36	100	172	100	208	100

embargo, la tendencia cambió referente a la distribución por niveles de acuerdo al tipo de institución, donde los hombres de establecimientos subvencionados reportaron una mayor proporción (51.52 %) en el rango alto (6 a 7), mientras que las mujeres se concentraron más (41.67 %) en el nivel medio (4 a 5). A pesar de que la menor proporción de ambos sexos se ubicó en el nivel bajo (1 a 3), las mujeres tuvieron una mayor presencia (25 %) en el rango bajo, respecto a los hombres (9.09 %). Los porcentajes del nivel medio fueron similares entre ambos sexos. En los establecimientos públicos el rango medio predominó (52.78 % para los hombres y 56.40 % para las mujeres). También se presentó una distribución bastante equilibrada entre hombres y mujeres en el rango bajo (19.44 % y 18.60 %, respectivamente) y alto.

Los resultados obtenidos señalan que, el bienestar psicológico tiende a concentrarse en el nivel medio en ambos tipos de establecimientos, similar en la resiliencia, pero con una notable proporción de hombres en subvencionados, ubicados en el nivel alto. Las mujeres obtuvieron una mayor representación en el nivel bajo en subvencionados (13.19 % en bienestar, 25.00 % en resiliencia), lo que podría reflejar condiciones específicas que afectan su bienestar y resiliencia en este contexto. Por su parte, los hombres destacaron en el nivel bajo en los establecimientos públicos para el bienestar (22.22 %), pero su resiliencia en el mismo nivel fue más cercana a la de las mujeres (19.44 % vs 18.60 %),

sugiriendo que el bienestar podría ser un área más crítica para ellos en ese entorno. Dichos resultados sugieren que los establecimientos subvencionados parecen tener un impacto desproporcionado en las mujeres, particularmente en resiliencia, donde una cuarta parte de ellas cae en el rango bajo. Mientras que, en los públicos, los hombres podrían estar enfrentando desafíos específicos de bienestar psicológico que no se reflejan tanto en su resiliencia.

Los resultados del análisis de Spearman (Tabla 6) mostraron correlaciones significativas, ($P < 0.001$), positivas y altas entre el bienestar psicológico y sus dimensiones ($Rho > 0.50$), a excepción del crecimiento personal, con la cual se registró una relación moderada ($Rho > 0.30$; < 0.50), lo que sugiere que es la menos relacionada al bienestar psicológico del docente, que su vida personal la separa de la laboral. En lo referente a la edad, no se encontraron correlaciones significativas con ninguna dimensión del bienestar psicológico ni con la resiliencia, ya que los coeficientes oscilaron entre -0.02 y 0.09. Ello indica que, en esta muestra, la edad no es un factor determinante de los niveles de resiliencia ni del bienestar psicológico, coincidiendo con estudios previos que reportan ausencia de asociación entre estas variables (Saavedra y Villalta, 2008; González-Arratia y Valdez, 2015).

Las dimensiones de bienestar psicológico mostraron diferencias significativas por sexo ($P < 0.05$), específicamente a favor de las mujeres en la puntuación total, relaciones positivas y crecimiento personal (Tabla 7). Esto

■ **Tabla 6. Análisis correlacional (Spearman) de las variables de estudio y edad.**
Table 6. Correlational analysis (Spearman) of study variables and age.

Variables	α	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Edad	-	-								
2. Resiliencia	0.80	0.09	-							
3. Bienestar psicológico	0.92	0.04	0.51*	-						
4. Autoaceptación	0.82	0.09	0.61*	0.84*	-					
5. Relaciones positivas	0.79	- 0.02	0.41*	0.85*	0.61*	-				
6. Autonomía	0.78	0.05	0.59*	0.82*	0.80*	0.57*	-			
7. Dominio del entorno	0.80	0.07	0.54*	0.87*	0.75*	0.63*	0.79*	-		
8. Propósito de vida	0.79	0.07	0.39*	0.79*	0.52*	0.76*	0.45*	0.60*	-	
9. Crecimiento personal	0.80	- 0.02	0.43*	0.43*	0.60*	0.51*	0.65*	0.58*	0.44*	-

*Indica la existencia de diferencia significativa ($P < 0.001$); α = Valores de consistencia interna alfa de Cronbach.

■ **Tabla 7. Análisis de la prueba robusta de Yuen de las variables según sexo.**
Table 7. Analysis of the Yuen robust test of the variables according to sex.

Variables	Hombres		Mujeres		t	gl	d
	M	DE	M	DE			
Resiliencia	5.21	1.46	4.92	1.45	1.93	69.75	0.19
Bienestar psicológico	5.20	1.15	5.36	1.07	2.14*	51.31	0.22
Autoaceptación	5.57	1.37	5.62	1.27	0.31	51.01	0.05
Relaciones positivas	4.76	1.50	5.20	1.40	2.34*	57.15	0.25
Autonomía	5.55	1.35	5.63	1.30	0.49	52.63	0.06
Dominio del entorno	5.23	1.21	5.18	1.20	0.07	52.21	0.04
Propósito de vida	4.56	1.36	4.74	1.23	1.39	56.14	0.15
Crecimiento personal	5.56	1.22	5.81	1.24	2.14*	58.00	0.22

*Indica la existencia de diferencia significativa ($P < 0.05$).

puede reflejar su tendencia a construir redes de apoyo sólidas y a buscar un desarrollo profesional constante, como lo han reportado estudios con docentes en diversos contextos culturales (Akram, 2019; Saldarriaga y col., 2022). Aunque los hombres presentaron medias ligeramente superiores en resiliencia y dominio del entorno, estas diferencias no fueron estadísticamente significativas. También se observó que las mujeres obtuvieron medias más elevadas en propósito de vida, autonomía y autoaceptación, en comparación con los hombres, aunque sin diferencias significativas. Akram (2019) indicó que las docentes mujeres tienden a percibir una vida laboral con mayor propósito, y que aquellas que trabajan en instituciones privadas tam-

bién reportan mayor autonomía y relaciones positivas. Este autor destaca que dichos factores están vinculados con una mayor disposición para asumir responsabilidades profesionales. En el caso de América Latina, diversos estudios han señalado que, aunque las mujeres pueden enfrentar limitaciones económicas que afectan su autonomía, las políticas públicas recientes buscan beneficiar a quienes logran conciliar sus roles laborales, sociales y familiares, a fin de evitar retrocesos en materia de equidad de género (Becerra y Santellán, 2022; Güezmes y col., 2022; Bravo y Martínez, 2024).

Respecto a los resultados del análisis de Spearman (Tabla 6), estos mostraron corre-

laciones significativas ($P < 0.001$) y positivas entre la resiliencia y todas las dimensiones del bienestar psicológico, lo que indica que, quienes reportaron mayor resiliencia también tendieron a puntuar más alto en aspectos como la autoaceptación, la autonomía y el dominio del entorno, por lo que su relación fue más fuerte ($Rho > 0.50$), así mismo fue entre la resiliencia y el total de bienestar psicológico. En ese sentido, se evidencia que los docentes con una percepción positiva de sí mismos tienen una mayor capacidad para enfrentar adversidades. Ello se reflejó en el estudio de Briceño y col. (2022), donde se indicó que a mayor resiliencia, mayor capacidad de recuperación, asociada a la autoaceptación. Dicho resultado es consistente con estudios que destacan la importancia de la autoaceptación en la gestión del estrés y la resiliencia (Ryff y Singer, 2006). Por su parte, el vínculo encontrado con la autonomía es relevante en el ejercicio docente, al vincularse con el derecho y la libertad profesional para promover el bienestar, oportunidades de aprendizaje y desarrollo integral del estudiantado (Quezadas y col., 2023). Respecto a la relación entre resiliencia y dominio del entorno, resulta imprescindible destacar el nivel de adaptación que muestran tanto docentes jóvenes como experimentados ante contextos adversos para la enseñanza, como fue el caso de la enseñanza remota durante la pandemia (Reynoso y col., 2020; Segovia y col., 2020; Zamora-Betancourt y col., 2021; Villalobos y col., 2022).

Las dimensiones de crecimiento personal, relaciones positivas y propósito de vida registraron relaciones moderadas ($Rho > 0.30$; < 0.50) con la resiliencia (Tabla 7). Estos hallazgos demuestran que durante el ejercicio docente resulta relevante el desarrollo profesional vinculado al bienestar personal (crecimiento personal), así como la construcción de un propósito de vida (tanto personal como profesional) asociado al uso de estrategias para afrontar diversas situaciones (Gomero-Cárdenas y col., 2023; Olmedo y col., 2025). Asimismo, las relaciones positivas en el ámbito docente resultan fundamentales para generar un clima escolar y organizacional óptimo, tanto en las interacciones entre docentes como en las relaciones docente-alumno (Sanders y col., 2016; Villalobos y col., 2022).

En cuanto a la dependencia educacional, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas en ninguna de las dimensiones de bienestar psicológico ni de resiliencia (Tabla 8). Este hallazgo contrasta con estudios previos que sugieren la existencia de diferencias en la experiencia docente según el tipo de dependencia institucional (Villalobos y Assaél, 2018; Ministerio de Educación, 2024). La ausencia de diferencias en este estudio podría interpretarse como un indicio de que, independientemente del contexto institucional, los desafíos del entorno escolar y los recursos personales del profesorado se mantienen relativamente constantes. Ello subraya

■ **Tabla 8. Análisis de la prueba robusta de Yuen de las variables según la dependencia educacional.**
Table 8. Analysis of the Yuen robust test of the variables according to educational dependency.

Variables	Público		Subvencionado		t	gl	d
	M	DE	M	DE			
Resiliencia	4.98	1.61	4.97	1.31	0.76	192.54	0.06
Bienestar psicológico	5.34	1.14	5.34	1.05	0.42	226.62	0.05
Autoaceptación	5.64	1.31	5.59	1.29	0.77	203.74	0.07
Relaciones positivas	5.01	1.46	5.23	1.38	1.36	225.14	0.11
Autonomía	5.60	1.37	5.62	1.24	0.43	216.36	0.03
Dominio del entorno	5.23	1.25	5.15	1.15	1.22	220.90	0.10
Propósito de vida	4.74	1.26	4.68	1.24	0.47	225.68	0.04
Crecimiento personal	5.79	1.27	5.75	1.20	1.00	226.77	0.08

la importancia de desarrollar estrategias e intervenciones que fortalezcan el bienestar y la resiliencia en todos los docentes, sin distinción por tipo de establecimiento.

Los resultados del presente estudio reafirman la importancia de promover tanto el bienestar psicológico como la resiliencia en el profesorado. Si bien, la mayoría presentó niveles moderados a altos en estas variables, destaca que un 11.2 % (bienestar psicológico) y 20.26 % (resiliencia) de los docentes reportó niveles bajos, lo cual señala la necesidad de implementar acciones específicas de apoyo y fortalecimiento en este grupo. Tal como sugieren Ramos y col. (2023) y Sáez-Delgado y col. (2023a), el desarrollo de competencias emocionales y la implementación de programas de apoyo institucional pueden ser estrategias efectivas para mitigar el impacto de las demandas laborales en la salud mental docente (Lozano-Peña y col., 2023). Futuras investigaciones podrían centrarse en explorar cómo factores adicionales, como el apoyo institucional y las características personales, interactúan con las variables estudiadas para ofrecer una comprensión más integral del bienestar docente y así poder generar competencias socioemocionales en los docentes (Lozano-Peña, y col., 2021; 2022). Para esto es imprescindible proyectar el desarrollo de intervenciones que permitan desarrollar competencia que les permitan afrontar mejor los desafíos laborales para alcanzar niveles óptimos de bienestar (Lobos y col., 2023).

Dentro de las limitaciones del presente estudio, se encuentra que, es una investigación transversal, es decir, solo recoge datos en un momento y tiempo determinado. También, el tipo de instrumento, el cual es de autorreporte, por lo que puede tener sesgo de deseabilidad social (Sáez-Delgado y col., 2023b). Sin embargo, los hallazgos presentados contribuirán al diseño de intervenciones y políticas públicas orientadas a promover un entorno educativo más saludable y efectivo. Ello se plantea debido a que Chile en este último tiempo, le ha ido dando mayor importancia a la sa-

lud mental de los docentes (Orrego, 2023) y se han ido generando un mayor estudio de las variables que conlleva dicho concepto.

CONCLUSIONES

Este estudio ofrece un diagnóstico preliminar sobre el bienestar psicológico y la resiliencia del profesorado de educación básica en la región del Biobío, Chile. La ausencia de diferencias significativas en función del tipo de establecimiento educativo sugiere que los docentes, independientemente del contexto institucional, recurren a sus propios recursos personales (estrategias de afrontamiento) para enfrentar los múltiples desafíos inherentes a la labor docente. Se identificaron diferencias significativas por sexo, en las que las docentes mujeres reportaron puntuaciones más altas en bienestar psicológico total, relaciones positivas y crecimiento personal. Las correlaciones positivas entre resiliencia y las dimensiones del bienestar psicológico indicaron que, incluso ante contextos adversos como la pandemia por Covid-19, el profesorado mantiene fortalezas psicoemocionales que favorecen su adaptación y compromiso profesional. En conjunto, estos hallazgos subrayan la importancia de promover el desarrollo de competencias socioemocionales como una vía para fortalecer la salud mental y el desempeño profesional docente.

AGRADECIMIENTOS

Al proyecto FONDECYT Regular N°1241902, titulado: “promoción de la prosperidad docente por medio de la intervención ProSEL-iT basada en mundos virtuales con experiencias inmersivas y su efecto en las competencias socioemocionales, la resiliencia y el bienestar”. Al Grupo Consolidado de Investigación “Research and Innovation Group in Socioemotional Learning, Well-Being and Mental Health to Foster Thriving” (THRIVE4ALL) UCSC.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declararon no tener conflictos de intereses de ningún tipo.

REFERENCIAS

- Abad, F., Olea, J., Ponsoda, V. y García, C. (2011). Medición en ciencias sociales y de la salud. Editorial Síntesis Borrrel y Carrió.
- Akram, M. (2019). Psychological wellbeing of University Teachers in Pakistan. *Journal of Education and Educational Development*, 6(2), 235-253. <https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ1235082.pdf>
- Ávila, A. (2019). Perfil docente, bienestar y competencias emocionales para la mejora, calidad e innovación de la escuela. *Boletín Redipe*, 8(5), 131-144. <https://revista.redipe.org/index.php/1/article/view/741/685>
- Becerra, A. y Santellan, P. (2022). Mujeres: entre la autonomía y la vida familiar. Nóesis. *Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*, 27(53), 121-139. <https://doi.org/10.20983/noesis.2018.16>
- Bravo, S. y Martínez, B. (2024). Autonomía económica: un desafío para las mujeres trabajadoras en Chile. *Revista Perspectivas*, 43, 175-191. <https://ediciones.ucsh.cl/index.php/Perspectivas/article/view/3705/3101>
- Briceño, C., Briceño, M. y Montilla, A. (2022). Resiliencia y desempeño docente: valoraciones durante la pandemia del COVID-19. *Revista Internacional de Formação de Professores*, 22(004), 004-004. <https://periodicoscientificos.itp.ifsp.edu.br/index.php/rifp/article/download/473/348/2689>
- Consejo de la Unión Europea (2020). "Conclusiones del Consejo sobre el personal docente y formador del futuro" Diario oficial de la Unión Europea (2020/C 193/04). [En línea]. Disponible en: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=uriserv:OJ.C_.2020.193.01.0011.01.SPA. Fecha de consulta: 29 de marzo de 2023.
- De-Cordova, F., Berlanda, S., Pedrazza, M., & Fraizoli, M. (2019). Violence at school and the well-being of teachers. the importance of positive relationships. *Frontiers in Psychology*, 10, 1807. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.01807>
- Díaz, D., Rodríguez, M., Blanco, A., Moreno, B., Gallardo, I. y Valle, C. (2006). Adaptación de la Escala de Bienestar Psicológico de Ryff. *Psicothema*, 18(3), 572-577. <https://www.redalyc.org/pdf/727/72718337.pdf>
- Gaete, A., Castro, M., Pino, F. y Mansilla, D. (2017). Abandono de la profesión docente en Chile: Motivos para irse del aula y condiciones para volver. *Estudios Pedagógicos*, 43(1), 123-138. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07052017000100008>
- Gomero-Cárdenas, N., Gómez-Bedia, K., Ruiz, A. y Temoche-Guevara, C. (2023). Resiliencia como eje motivador en la docencia. *Koinoní*, 8(1), 553-564. <https://doi.org/10.35381/r.k.v8i1.2815>
- González-Arratia, N. y Valdez, J. (2015). Resiliencia. Diferencias por Edad en Hombres y Mujeres Mexicanos. *Acta de Investigación Psicológica*, 5(2), 1996-2010. [https://doi.org/10.1016/s2007-4719\(15\)30019-3](https://doi.org/10.1016/s2007-4719(15)30019-3)
- Güezmes, A., Scuro, L. y Bidegain, N. (2022). Igualdad de género y autonomía de las mujeres en el pensamiento de la CEPAL. *El Trimestre Económico*, 89(353), 311-338. <https://doi.org/10.20430/ete.v89i353.1416>
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, M. (2014). Metodología de la Investigación. McGraw-Hill.
- Lobos, K., Bustos, C., Saez-Delgado, F., Cobo-Rendon, R., & Bruna, C. (2023) Promoting ASC in the primary education classroom: The role of teacher training. *International Journal of School & Educational Psychology*, 11(3), 233-244. <https://doi.org/10.1080/21683603.2022.2105997>
- López-Angulo, Y., Mella-Norambuena, J., Sáez-Delgado, F., Portillo, S., & Reynoso, O. (2022). Association between teachers' resilience and emotional intelligence during the COVID-19 outbreak. *Revista Latinoamericana de Psicología*, 54, 51-59. <https://doi.org/10.14349/rlp.2022.v54.6>
- Lozano-Peña, G., Sáez-Delgado, F. y López-Angulo, Y. (2022). Competencias socioemocionales en docentes de primaria y secundaria: una revisión sistemática. *Páginas de Educación*, 15(1), 01-22. <https://doi.org/10.22235/pe.v15i1.2598>
- Lozano-Peña, G., Sáez-Delgado, F., López-Angulo, Y., & Mella-Norambuena, J. (2021). Teachers' Social-Emotional Competence: History, Concept, Models, Instruments, and Recommendations for Educational Quality. *Sustainability*, 13(21), 12142; <https://doi.org/10.3390/su132112142>
- Lozano-Peña, G., Sáez-Delgado, F., López-Angulo, Y., Mella-Norambuena, J., Contreras-Saavedra, C. y Ramos-Huenteo, V. (2023). Programas de intervención docente en competencias socioemocionales: una revisión sistemática de la literatura. *Aula de Encuentro*, 25(2), 215-241. <https://doi.org/10.17561/ae.v25n2.7391>
- Martin, A. & Marsh, H. (2008). Academic buoyancy: Towards an understanding of students' everyday aca-

demic resilience. *Journal of School Psychology*, 46, 53-83. <https://doi.org/10.1016/j.jsp.2007.01.002>

Mayordomo, T., Sales, A., Satorres, E. y Meléndez, J. (2016). Bienestar psicológico en función de la etapa de vida, el sexo y su interacción. *Pensamiento Psicológico*, 14(2), 101-112. <http://www.scielo.org.co/pdf/pepsi/v14n2/v14n2a08.pdf>

Ministerio de Educación (2024). Política Nacional de Convivencia Educativa 2024 – 2030. Marco de actuación y visión institucional. [En línea]. Disponible en: <https://convivenciaparaciudadania.mineduc.cl/pnce2024-2030/>. Fecha de consulta: 10 de noviembre de 2024.

Mineduc, Ministerio de Educación de Chile (2025). Tipos de establecimiento según financiamiento. Ayuda Mineduc. [En línea]. Disponible en: <https://www.ayudamineduc.cl/ficha/tipos-de-establecimiento-segun-financiamiento-4>. Fecha de consulta: 10 de noviembre de 2024.

Muñiz, J., Elosua, P. y Hambleton, R. K. (2013). Directrices para la traducción y adaptación de los tests: Segunda edición. *Psicothema*, 25(2), 151-157. <https://doi.org/10.7334/psicothema2013.24>

Olmedo, E., Pardo, S., Camacho, B., Cueva, M., Pacheco, M., Camacho, M., Camacho González, D. y Gajón, S. (2025). La motivación docente como pilar fundamental de la excelencia educativa. *Revista InveCom*, 5(1), 1-16. <https://doi.org/10.5281/zenodo.11491705>

Orrego, V. (2023). Salud mental docente tras año y medio de pandemia por COVID-19. (2023). *Revista de Estudios y Experiencias en Educación*, 22(49), 127-141. <https://doi.org/10.21703/rexe.v22i49.1689>

Papatraianou, L., Strangeways, A., Beltman, S., & Schuberg, E. (2018). Beginning teacher resilience in remote Australia: a place-based perspective. *Teachers and Teaching*, 24(8), 893-914. <https://doi.org/10.1080/13540602.2018.1508430>

Pérez-Salas, C., Parra, V., Sáez-Delgado, F., & Olivarres, H. (2021). Influence of Teacher-Student Relationships and Special Educational Needs on Student Engagement and Disengagement: A Correlational study. *Frontier in Psychology*, 12(708157), 1-12. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.708157>

Quezadas, A., Baeza, E., Ovando, J., Gómez, C. y Bracqbien, C. (2023). Educación para la resiliencia, un análisis desde la perspectiva de niñas, niños y docentes. *Revista Latinoamericana de Estudios Educativos*, 53(1), 155-177. <https://doi.org/10.48102/rlee.2023.53.1.534>

Ramos-Huenteo, V., García-Vásquez, H., Olea-González, C., Lobos-Peña, K. y Sáez-Delgado, F. (2020). Percepción docente respecto al trabajo pedagógico durante la COVID-19. *Revista Cienciamérica*, 9(2), 334-353. <http://dx.doi.org/10.33210/ca.v9i2.325>

Ramos, V., Sáez-Delgado, F., Mella-Norambuena, J. y López-Angulo, Y. (2023). Agotamiento, interferencia emocional, dominio del entorno, autoeficacia y compromiso de profesores durante la pandemia COVID-19. *Diálogos Sobre Educación*, 28, 1-18. <https://doi.org/10.32870/dse.v0i28.1355>

Reynoso, O., Portillo, S., & Castellanos, L. (2020). Explanatory model of teacher satisfaction in the remote teaching period. *IJERI: International Journal of Educational Research and Innovation*, (15), 229-247. <https://doi.org/10.46661/ijeri.5236>

Ryff, C. & Keyes, C. (1995). The structure of psychological well-being revisited. *Journal of Personality and Social Psychology*, 69(4), 719-727. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.69.4.719>

Ryff, C. & Singer, B. (2006). Best news yet on the six-factor model of wellbeing. *Social Science Research*, 35(4), 1103-1119. <https://doi.org/10.1016/j.ssresearch.2006.01.002>

Saavedra, E. y Villalta, M. (2008). Medición de las características resilientes: un estudio comparativo en personas entre 15 y 65 años. *Liberabit*, 14(14), 32-40.

Sáez-Delgado, F., López-Angulo, Y., Mella-Norambuena, J., Baeza-Sepúlveda, C., Contreras-Saavedra, C., & Lozano-Peña, G. (2022). Teacher Self-Regulation and Its Relationship with Student Self-Regulation in Secondary Education. *Sustainability*, 14(24), 16863. <https://doi.org/10.3390/su142416863>

Sáez-Delgado, F., Mella-Norambuena, J., López-Angulo, Y., León-Ron, V., & Contreras-Saavedra, C. (2023b). Teacher Self-regulation: Validation of Scales in Chile Applied with an Online Technological Tool. *Revista Costarricense de Psicología*, 42(1), 25-43. I: <http://dx.doi.org/10.22544/rcps.v42i01.02>

Sáez-Delgado, F., Ramos, P. y Mella-Norambuena, M. (2023a). Relación entre inteligencia emocional y salud mental en docentes chilenos: Implicaciones para la formación profesional. *Revista Chilena de Psicología Educativa*, 15(2), 65-82.

Saldarriaga, O., Ledesma, M., Malpartida, J. y Díaz, J. (2022). Resiliencia docente en las escuelas públicas de Lima Metropolitana – Perú. *Revista de Ciencias Sociales*, 28(1), 261-274. <https://doi.org/10.31876/rcs.v28i1.37690>

- Sanders, J., Munford, R., & Liebenberg, L. (2016). The role of teachers in building resilience of at risk youth. *International Journal of Educational Research*, 80, 111-123. <https://doi.org/10.1016/j.ijer.2016.10.002>
- Segovia, S., Fuster-Guillen, D., & Ocaña-Fernández, Y. (2020). Resilience of the teacher in the learning in rural schools in Peru. *Revista Electrónica Educare*, 24(2), 1-26. <https://doi.org/10.15359/ree.24-2.20>
- Superintendencia de Educación (2023). Denuncias estadísticas: datos abiertos. [En línea]. Disponible en: <https://www.supereduc.cl/denuncias-ingresadas/>. Fecha de consulta: 10 de octubre de 2024.
- Turan, M. E. (2021). The Relationship between Social Emotional Learning Competencies and Life Satisfaction in Adolescents: Mediating Role of Academic Resilience. *International Online Journal of Educational Sciences*, 13(4), 1126-1142. <https://doi.org/10.15345/iojes.2021.04.012>
- UNESCO, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (2021). Más allá de los números: poner fin a la violencia y el acoso en el ámbito escolar. [En línea]. Disponible en: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf00000378398>. Fecha de consulta: 10 de octubre de 2024.
- UNESCO, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (2024). Violencia y acoso escolar: la UNESCO reclama una mejor protección de los estudiantes. [En línea]. Disponible en: <https://www.unesco.org/es/articles/violencia-y-acoso-escolar-la-unesco-reclama-una-mejor-proteccion-de-los-estudiantes>. Fecha de consulta: 10 de noviembre de 2024.
- Véliz, A. (2012). Propiedades psicométricas de la escala de bienestar psicológico y su estructura factorial en universitarios chilenos. *Psicoperspectivas*, 11(2), 143-163. <https://doi.org/10.5027/psicoperspectivas-vol11-issue2-fulltext-196>
- Vera, G. G., Valenzuela, J. P., & Sotomayor, C. (2015). Against all odds: Outstanding reading performance among Chilean youth in vulnerable conditions. *Comparative Education Review*, 59(4), 693-716. <https://doi.org/10.1086/683108>
- Vicente-de-Vera, M. y Gambarte, M. (2019). Liderazgo Pedagógico en Educación Secundaria: Aportaciones desde la Evaluación de Burnout Resiliencia en docentes. *International Journal of Educational Leadership and Management*, 7(1), 104-134. <https://doi.org/10.17583/ijelm.2019.3519>
- Villalobos, P. y Assaél, J. (2018). Dimensiones individuales, relacionales e institucionales en la resiliencia de profesores principiantes egresados de una universidad pública. *Psicoperspectivas*, 17(1), 144-154. <https://dx.doi.org/10.5027/psicoperspectivas-vol17-issue1-fulltext-1145>
- Villalobos, P., Barría-Herrera, P. y Pasmanik, D. (2022). Relación docentes - estudiantes y resiliencia docente en contexto de pandemia. *Psicoperspectivas*, 21(2), 131-143. <https://dx.doi.org/10.5027/psicoperspectivas-vol21-issue2-fulltext-2567>
- Zamora-Betancourt, M., Portillo-Peñuelas, S., Reynoso-González, O. y Caldera-Montes, J. (2021). Autopercepción de la preparación docente ante el COVID-19 en México. *Educación y Humanismo*, 23(41), 1-26. <https://doi.org/10.17081/eduhum.23.41.4594>



Ninfas de tercer estadio de *Bactericera cockerelli* sulc. (Hemíptera: Triozidae).



Insecto adulto de *Bactericera cockerelli* sulc. (Hemíptera: Triozidae)

Imágenes de Alberto Roque Enriquez

Mortalidad de ninfas de *Bactericera cockerelli* por ingredientes activos químicos potencializados con nanopartículas de grafito

Mortality of *Bactericera Cockerelli* nymphs by active chemical ingredients enhanced with graphite nanoparticles

Alberto Roque-Enriquez, Rocío de Jesús Díaz-Aguilar, Yisa María Ochoa-Fuentes, Ernesto Cerna-Chávez*

RESUMEN

El insecto *Bactericera cockerelli* es una de las plagas más importantes en México en cultivos de solanáceas. Su control y manejo regularmente es mediante ingredientes activos químicos. Actualmente, en la agricultura, se busca mejorar la eficiencia de los insecticidas logrando un bajo impacto ambiental, pero con alta efectividad. El objetivo de la presente investigación fue evaluar la mortalidad de ninfas de *B. cockerelli*, mediante bioensayos *in vitro*, con ingredientes activos químicos mezclados con nanopartículas de grafito. Los bioensayos se realizaron bajo condiciones de laboratorio, donde se evaluó el efecto de los insecticidas imidacloprid, lambda cialotrina y dimetoato, solos y combinados con nanografito, contra ninfas del insecto *B. cockerelli*. Las CL_{50} de las combinaciones imidacloprid-nanografito, lambda cialotrina-nanografito y dimetoato-nanografito fueron de 1.96 mg/L, 13.85 mg/L y 57.31 mg/L, respectivamente, alcanzando mortalidades por encima del 90 % en todos los insecticidas. Las CL_{50} de los ingredientes activos solos fueron de 103.07 mg/L, 285.52 mg/L y 492.35 mg/L, para los mismos insecticidas. Las nanopartículas de grafito potenciaron 52.34, 20.60 y 8.59 veces, el efecto letal respecto a los productos solos. La combinación de insecticidas con nanopartículas de grafito, mostró una alta efectividad en las mortalidades contra las ninfas de *B. cockerelli*, en comparación con los productos solos, por lo que representan una alternativa de control prometedor al reducir las dosis de aplicación.

PALABRAS CLAVE: potenciación, nanoformulados, paratrioza, pesticidas, sinergia.

ABSTRACT

Bactericera cockerelli is one of the most important pests in Mexico in solanaceous crops. Their control and management are typically achieved through chemical active ingredients. Currently, in agriculture, efforts are being made to improve the efficiency of insecticides achieving low environmental impact and high effectiveness. The objective of this research was to evaluate the mortality of *B. cockerelli* nymphs using *in vitro* bioassays with chemical active ingredients mixed with graphite nanoparticles. The bioassays were conducted under laboratory conditions, where the effect of three insecticides: imidacloprid, lambda cyalothrin, and dimethoate, alone and in combination with nano-graphite, against *B. cockerelli* nymphs was evaluated. The LC_{50} of the imidacloprid-nanographite, lambda cyalothrin-nanographite, and dimethoate-nanographite combinations were 1.96 mg/L, 13.85 mg/L, and 57.31 mg/L, respectively, achieving mortality rates above 90 % for all insecticides. The LC_{50} of the active ingredients alone were 103.07 mg/L, 285.52 mg/L, and 492.35 mg/L for the same insecticides. The graphite nanoparticles enhanced the lethal effect 52.34, 20.60, and 8.59 times more than the products alone. The combination of insecticides with graphite nanoparticles showed high effectiveness in mortality against *B. cockerelli* nymphs, compared to the products alone, and represents a promising control alternative by reducing application rates.

KEYWORDS: potentiation, nanoformulations, paratrioza, pesticides, synergy.

*Correspondencia: jabaly1@yahoo.com/ Fecha de recepción: 10 de enero de 2025/ Fecha de aceptación: 8 de abril de 2025/ Fecha de publicación: 10 de abril de 2025.

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Parasitología, Calzada Narro núm. 1923, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. C.P. 25315.

INTRODUCCIÓN

El insecto *B. cockerelli* (Sulc) (Hemíptera: Trio- zidae), conocido comúnmente como paratrio- za, pulgón saltador o salerillo, es una plaga que a lo largo de los años sigue generando da- ños importantes en los cultivos de solanáceas en el mundo (Butler y Trumble, 2012; Ville- gas-Rodríguez y col., 2014; Tucuch-Haas y col., 2020). La enfermedad del “amarillamiento del psílido” se relaciona históricamente al insecto *B. cockerelli*, y es causada al inyectar una toxina al floema de la planta a través de su sa- liva, como parte de su forma de alimentación, desde el estadio de ninfa hasta la etapa de adulto, lo que genera la infección; provocando aborto floral, clorosis, retraso de crecimen- to, y en algunos casos muerte de la planta. Es vinculado como vector de la bacteria *Candi- datus Liberibacter solanacearum* que daña se- veramente cultivos de solanáceas (Liu y Trum- ble, 2006; Munyaneza, 2013; Olaniyan y col., 2020; Rivera-Martínez y col., 2020).

En México, este psílido se asocia a grandes pérdidas económicas en producción de sola- náceas como papa (*Solanum tuberosum* L.), tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y chile (*Cap- sicum* spp), siendo la última especie la pre- ferida del insecto (Ramírez-Dávila y col., 2012; EPPO, 2014; Trujillo-García y col., 2018), por lo que sus plantas presentan un mayor daño y disminución de su producción (Lozano-Gu- tiérrez y col., 2018). Aun así, el cultivo de chile es uno de los productos agrícolas de mayor importancia en México, ocupando entre el se- gundo y cuarto lugar de producción a nivel mundial (SADER, 2024). A nivel nacional se producen alrededor de 3 millones 237 000 T, siendo los principales estados productores Si- naloa con 751 000 T, Chihuahua con 701 000 T y Zacatecas con 480 694 T, representando un 59.7 % del volumen nacional, de acuerdo al Servicio de Información Agroalimentaria y Pes- quero (SIAP, 2024).

Los métodos de control para el insecto care- cen de eficiencia, al no considerar las agru- paciones y propagación dentro de la parcela que permita focalizarlas; los productos más

utilizados por los productores son los insecc- tidas químicos, aunque los agricultores de- tectan que su efectividad no es satisfactoria, por varios factores, como eficiencia de apli- cación, entre otros (Vega-Gutiérrez y col., 2008; Ramírez-Dávila y col., 2012). Por otro lado, la toxicidad y presencia en el medio ambiente de los ingredientes activos químicos ha gene- rado preocupación, ya que aproximadamente, más del 90 % de los insecticidas formulados que se comercializan no desempeñan sus efec- tos por diferentes circunstancias, como la degradación, volatilización y lixiviación. Esto conlleva a que los insecticidas se apliquen en concentraciones más altas para asegurar su efecto por un periodo idóneo y contrarres- tar las pérdidas (Mogul y col., 1996; Xiang y col., 2014).

El grafito es un material tridimensional de carbono construido por un gran número de placas superpuestas de cristales de grafeno débilmente unidas. El grafeno se obtiene a partir del grafito, es un material bidimensio- nal de carbono que consiste en una sola ca- pa de átomos de carbono organizados en una estructura de periodo hexagonal (Rodríguez y Kharissova, 2008; Behbudi, 2020). Las nano- partículas derivadas del carbono, en general, han demostrado que tienen propiedades insecc- tidas. Se ha documentado que externa- mente afectan la integridad de la cutícula y la pigmentación. Internamente alteran la ex- presión genética, el metabolismo de proteínas, lípidos y carbohidratos, e incrementan las es- pecies reactivas de oxígeno y modifican la actividad bioquímica, además de que presen- tan también como característica el poder ser portadoras de ingredientes activos (Liu y col., 2009; Wang y col., 2019b).

El uso de nanopartículas, en combinación con ingredientes activos, se realiza con la finali- dad de que se superen las limitaciones que presentan los insecticidas convencionales, al garantizar la solubilidad del agua, dispersión más uniforme y velocidad de disolución. En- tre las ventajas de las nanoformulaciones des- tacan el bajo impacto ambiental y que permi-

ten realizar aplicaciones más seguras (Venugopal y Sainadh, 2016; Kumar y Kalita, 2017).

Las nanopartículas de grafito cuentan con propiedades únicas, las cuales destacan naturalmente de las imperfecciones de sus estructuras cristalinas y no han presentado problemas de toxicidad en cientos de años (Dziewięcka y col., 2021). Pueden usarse como aditivo de insecticidas para mejorar su eficiencia en la agricultura (Li y col., 2022). Las nanopartículas de carbono han demostrado alta tasa de afectación en diferentes insectos, por ejemplo, *Bemisia tabaci*, *Spodoptera frugiperda* y *Plutella xylostella*, registrando desde 30 % a 70 % de mortalidad sobre estos insectos (Wang y col., 2021; Chen y col., 2022; Lui y col., 2022). A menor tamaño de la partícula mayor será su toxicidad y son más eficientes al introducirse a los insectos (Wang y col., 2019a).

El objetivo de esta investigación fue evaluar la tasa de mortalidad de ninfas de *Bactericera cockerelli* mediante bioensayos *in vitro* con ingredientes activos químicos mezclados con nanopartículas de grafito.

MATERIALES Y MÉTODOS

Obtención de las ninfas

Las ninfas de *B. cockerelli* se recolectaron en la zona productora de chile del estado de San Luis Potosí, México. Se tomaron hojas con ninfas del estrato medio de las plantas de chile serrano (*Capsicum annuum*), en etapa de fructificación, y se transportaron en una hielera para evitar la exposición a temperaturas extremas. El trabajo se llevó a cabo en el Laboratorio de Toxicología de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) en Saltillo, Coahuila, México.

Bioensayo

Se realizó en condiciones de laboratorio (temperatura de $24\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, humedad relativa de 60 % y fotoperiodo de 14:10 h/luz: oscuridad) mediante la técnica del método de prueba de susceptibilidad del IRAC 002, versión 3 (IRAC, 2024). Las hojas con 30 a 50 ninfas del tercero al quinto estadio de *B. cockerelli*

se sumergieron durante 5 s en las diferentes concentraciones de los ingredientes activos químicos, solos o mezclados con nanopartículas de grafito. Para la determinación de las concentraciones se realizó una ventana biológica, que fue desde 1 mg/L a 10 000 mg/L. Los insecticidas evaluados fueron Muralla Max® (imidacloprid al 19.60 %), Karate Zeon® (lambda cyaotrina 5.51 %) y Deltapir® (dime-toato 38.50 %) a concentraciones de 10 mg/L, 100 mg/L, 500 mg/L, 1 000 mg/L, 2 000 mg/L, 3 000 mg/L solos o adicionados con nanopartículas de grafito (80 nm a 200 nm) al 1 %, 3 %, 5 % y 10 %, respectivamente (proporcionadas por la empresa CULTA S. A. DE C. V.®). Cada tratamiento contó con tres repeticiones, un testigo absoluto y un testigo con nanopartículas de grafito, a los porcentajes antes mencionados. A todos los tratamientos se les adicionó tween 20 como adherente. Las hojas tratadas se dejaron secar sobre papel filtro durante 3 s (Whatman™, modelo: 17199048, China), y posteriormente se colocaron con papel húmedo en cajas Petri.

Evaluación de la mortalidad

La mortalidad se evaluó a las 24 h con la ayuda de un microscopio estereoscopio binocular 32X (Carl Zeiss Microlmaging GmbH 37081, Gottingen, Alemania). Para considerar ninfas muertas, los criterios de mortalidad fueron aquellas ninfas con cambio de coloración café marrón o consistencia lechosa, deshidratadas y que no respondieron al estímulo de un pincel.

El bioensayo se realizó con un diseño de máxima verosimilitud (finnex) (medida de la tendencia de la evolución de dos variables). A los resultados se les aplicó la corrección de mortalidad mediante la fórmula de Henderson y Tilton (1955) (basada en la comparación de la mortalidad inducida por el tratamiento, respecto al testigo).

Análisis estadístico

Las mortalidades obtenidas se analizaron usando análisis de varianza (ANOVA) y comparación de medias mediante la prueba Tukey ($P \geq 0.05$), utilizando el programa estadístico

(Statistical Analysis System) SAS, versión 9.1. La desviación estándar se definió mediante la raíz cuadrada de la varianza.

Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis dosis-respuesta Probit para determinar la CL_{50} mediante el programa SAS versión 9.1, lo que permitió calcular el grado de sinergismo. La relación de sinergia (RS) se calculó dividiendo la CL_{50} del ingrediente ac-

tivo químico entre la CL_{50} de la combinación del insecticida con nanopartículas de grafeno.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El tratamiento de ninfas de *B. cockerelli* con nanopartículas de grafito a concentraciones de 5 % y 10 %, sin insecticidas, registraron mortalidades de 27.0 % y 41.2 %, respectivamente (Tabla 1). Estos resultados indicaron que, las nanopartículas tuvieron efecto letal en los

■ Tabla 1. Mortalidad después de 24 h de ninfas *B. cockerelli* expuestas a nanopartículas de grafito e insecticidas imidacloprid, lambda cyalotrina y dimetoato solos y combinados.

Table 1. Mortality after 24 hours of nymphs of *B. cockerelli* exposed to graphite nanoparticles and insecticides imidacloprid, lambda cyalothrin and dimethoate alone and in combination.

Concentración de insecticida (mg/L)	Nanopartículas de grafito (%)				
	Control	1	3	5	10
Imidacloprid*					
Control	0.00 ± 0.0	6.3 ± 3.03 ^{gD}	8.5 ± 1.81 ^{gC}	27.0 ± 0.86 ^{gB}	41.2 ± 4.65 ^{gA}
10	35.1 ± 3.32 ^{fC}	30.6 ± 4.83 ^{fE}	31.8 ± 5.10 ^{fD}	55.9 ± 1.56 ^{fB}	66.4 ± 1.08 ^{fA}
100	40.7 ± 1.86 ^{eD}	38.5 ± 2.32 ^{eE}	41.1 ± 2.20 ^{eC}	63.3 ± 0.59 ^{eB}	79.7 ± 0.07 ^{eA}
500	56.9 ± 0.04 ^{dE}	63.2 ± 0.05 ^{dD}	65.1 ± 0.03 ^{dC}	77.6 ± 0.01 ^{dB}	82.8 ± 0.01 ^{dA}
1 000	75.6 ± 0.90 ^{cC}	68.5 ± 0.30 ^{cE}	73.5 ± 0.45 ^{cD}	82.8 ± 0.14 ^{cB}	85.8 ± 0.01 ^{cA}
2 000	78.8 ± 1.27 ^{bE}	81.91 ± 1.74 ^{bD}	84.6 ± 1.68 ^{bC}	88.3 ± 0.45 ^{bB}	93.6 ± 0.24 ^{bA}
3 000	82.0 ± 1.72 ^{aE}	87.7 ± 2.67 ^{aD}	90.3 ± 2.57 ^{aC}	92.4 ± 0.79 ^{aB}	100 ± 0.66 ^{aA}
Lambda cyalotrina*					
Control	0.00 ± 0.0	6.3 ± 3.03 ^{gD}	8.5 ± 1.81 ^{gC}	27.0 ± 0.86 ^{gB}	41.2 ± 4.65 ^{gA}
10	21.6 ± 6.12 ^{fE}	24.2 ± 5.21 ^{fD}	40.3 ± 3.76 ^{fC}	43.9 ± 2.98 ^{fB}	55.4 ± 1.63 ^{fA}
100	25.7 ± 4.23 ^{eE}	27.9 ± 3.70 ^{eD}	50.8 ± 1.35 ^{eC}	55.3 ± 0.84 ^{eB}	58.1 ± 1.21 ^{eA}
500	53.6 ± 0.04 ^{dD}	33.7 ± 1.95 ^{dE}	61.1 ± 0.22 ^{dC}	72.9 ± 0.03 ^{dA}	70.8 ± 0.09 ^{dB}
1 000	70.0 ± 1.53 ^{cE}	73.3 ± 1.84 ^{cD}	83.5 ± 0.72 ^{cB}	76.9 ± 0.17 ^{cC}	91.3 ± 0.70 ^{cA}
2 000	74.6 ± 2.27 ^{bE}	86.8 ± 4.47 ^{bC}	92.9 ± 1.81 ^{bA}	84.4 ± 0.69 ^{bD}	92.2 ± 0.78 ^{bB}
3 000	76.1 ± 2.55 ^{aE}	87.2 ± 4.55 ^{aD}	93.4 ± 1.89 ^{aB}	91.5 ± 1.47 ^{aC}	93.6 ± 0.91 ^{aA}
Dimetoato*					
Control	0.00 ± 0.0	6.3 ± 3.03 ^{gD}	8.5 ± 1.81 ^{gC}	27.0 ± 0.86 ^{gB}	41.2 ± 4.65 ^{gA}
10	21.6 ± 5.78 ^{fE}	22.5 ± 5.73 ^{fD}	26.5 ± 6.62 ^{fC}	33.6 ± 4.89 ^{fB}	36.4 ± 5.10 ^{fA}
100	30.4 ± 2.38 ^{eD}	27.6 ± 3.54 ^{eE}	31.3 ± 4.51 ^{eC}	37.0 ± 3.70 ^{eB}	43.1 ± 2.96 ^{eA}
500	51.7 ± 0.02 ^{dD}	48.8 ± 0.02 ^{dE}	61.9 ± 0.02 ^{dC}	65.1 ± 0.00 ^{dB}	72.3 ± 0.05 ^{dA}
1 000	54.5 ± 0.11 ^{cE}	64.4 ± 0.78 ^{cD}	81.3 ± 1.68 ^{cC}	83.6 ± 1.29 ^{cB}	86.3 ± 1.00 ^{cA}
2 000	75.7 ± 2.70 ^{bD}	74.2 ± 2.17 ^{bE}	85.9 ± 2.41 ^{bC}	87.3 ± 1.79 ^{bB}	91.3 ± 1.61 ^{bA}
3 000	79.2 ± 3.40 ^{aE}	84.8 ± 4.29 ^{aD}	88.7 ± 2.89 ^{aC}	92.3 ± 2.57 ^{aB}	95.8 ± 2.24 ^{aA}

*Se reporta el porcentaje de mortalidad y la desviación estándar.

^{a, b, c}Letras distintas indican diferencia significativa (P < 0.05) entre concentraciones de insecticida (hileras) para un mismo nivel de nanopartículas de grafito (columnas).

^{A, B, C}Letras distintas indican diferencia significativa (P < 0.05) entre concentraciones de nanopartículas de grafito (columnas) para un mismo nivel de insecticida (columnas).

organismos, pero solo alcanzaron a inducir menos del 50 % de mortalidad.

El tratamiento con 1 % de concentración de nanopartículas de grafito evaluado en este estudio, presentó un comportamiento de mortalidad (6.3 %) similar al óxido de grafeno (GO, por sus siglas en inglés: graphane oxide), con una baja tasa de mortalidad (3.33 %) sobre el barrenador asiático del maíz, cuando fue tratado con el compuesto solo (25 µg/mL), el cual se incrementó al combinarlo con imidacloprid, reportando mortalidades del 26.37 % al 72.6 %, demostrando su sinergia, bajo condiciones de laboratorio (Wang y col., 2019a).

La combinación de las nanopartículas de grafito con los tres insecticidas estudiados, mostró un incremento significativo en su eficiencia letal (Tabla 1). Los tratamientos de 500 mg/L, en todos los ingredientes activos, presentaron mortalidades por encima del 50 % (a excepción de lambda cyalotrina y dimetoato, ambos con una concentración al 1 % de nanopartículas de grafito); y todos los tratamientos de 2 000 mg/L y 3 000 mg/L indujeron mortalidades por encima del 70 %, incluido el control, y al 90 % en todas las concentraciones del 10 % de grafito. También se registró un 90 % de mortalidad en las concentraciones del 3 % y 5 % de grafito a 3000 mg/L (a excepción de dimetoato al 3 % de grafito).

El ingrediente activo clorpirifos registró mortalidades en condiciones de laboratorio del 23.67 % al 42.33 % contra el ácaro *Tetranychus truncatus*, mientras que, combinado con óxido de grafeno aumentó la mortalidad de 41.67 % a 86.33 % (Wang y col., 2019b). En el caso del gusano cogollero de la cápsula de algodón, alimentado con GO, se redujo la esperanza de vida en hembras y machos (Li y col., 2022). El uso de grafeno (en su forma no oxidada) combinado con lambda cyalotrina en una relación 3/1 (grafeno-insecticida) indujo una mortalidad del 62.91 % contra el tercer estadio del gusano de la cápsula de algodón, superior a la de ambos compuestos en forma individual. Su acción se asoció con el efecto

causado sobre las células espinosas de la epicutícula del gusano, incrementando la permeabilidad y, por ende, su toxicidad (Chen y col., 2022). Wang y col. (2021), observaron bajo condiciones controladas, la eficacia de moléculas de biocarbón desarrolladas en el laboratorio, cargadas con conidios *Cordyceps fumosorosea*, mediante su inmersión en suspensiones con concentraciones de 10 ppm, 20 ppm, 50 ppm y 100 ppm de conidios, contra *Bemisia tabaci*, registrando mortalidades acumuladas a los 7 d por encima del 90 % para ninfas del segundo, tercer estadio y pupas con valores de CL_{50} de las nanopartículas de 6.80 ppm, 7.45 ppm y 8.64 ppm, respectivamente. Estos estudios muestran que, las partículas derivadas de carbono son candidatas prometedoras en el ámbito biológico, para utilizarse en la agricultura como aditivo de pesticidas, por su versatilidad y gran potencial al mejorar su efectividad (Li y col., 2022).

Dosis letal CL_{50}

La CL_{50} registrada solo para imidacloprid fue de 103.07 mg/L, la cual mostró la mayor tasa de mortalidad de los tres insecticidas, aplicados sin las nanopartículas de grafito. De la misma manera, al combinarse con 5 % y 10 % de nanopartículas de grafito, este activo químico, presentó las concentraciones CL_{50} más bajas (8.75 mg/L y 1.96 mg/L, respectivamente); con una relación de sinergia (RS) de 11.77 veces y 52.34 veces, respectivamente, indicando la capacidad del grafito en nanopartículas para potenciar la efectividad del imidacloprid como insecticida (Tabla 2). Las CL_{50} registrada para lambda cyalotrina, aplicada sola a ninfas de *B. cockerelli* fue de 285.52 mg/L. Su eficacia se incrementó notablemente a partir de su combinación con 3 % de nanopartículas de grafito (48.10 mg/L) y alcanzó su máxima efectividad al combinarse con 10 % (13.85 mg/L), con una RS de 20.60 veces (Tabla 3). El dimetoato-grafito presentó la menor tasa de letalidad contra las ninfas de *B. cockerelli* con una dosis CL_{50} de 492.35 mg/L cuando se aplicó sólo el insecticida, y alcanzando únicamente una dosis de CL_{50} de 57.31 mg/L al combinarse con 10 % de nano-

■ Tabla 2. Dosis letal (CL_{50} ; 24 horas) en ninfas de *B. cockerelli* del imidacloprid a diferentes concentraciones de nanopartículas de grafito.

Table 2. Lethal dose (LC_{50} ; 24 hours) in *B. cockerelli* nymphs of imidacloprid at different concentrations of graphite nanoparticles.

Concentraciones de grafito (%)	CL_{50} (mg/L)	LFI	LFS	Ec. Predicción	P-valor	RS
Control	103.071	17.167	275.943	$Y = -1.124 + 0.558$	< 0.000 1	
1	119.795	31.430	279.446	$Y = -1.364 + 0.656$	< 0.000 1	0.8 x
3	94.984	24.779	217.677	$Y = -1.365 + 0.690$	< 0.000 1	1 x
5	8.753	2.151	20.912	$Y = -0.453 + 0.481$	< 0.000 1	11.77 x
10	1.969	7.698	18.989	$Y = -0.143 + 0.486$	0.000 1	52.34 x

CL_{50} : Concentración letal media. LFI: Límite fiducial inferior. LFS: Límite fiducial superior. RS: relación de sinergia en valores de CL_{50} .

■ Tabla 3. Dosis letal (CL_{50} ; 24 horas) en ninfas de *B. cockerelli* de lambda cyalotrina a diferentes concentraciones de nanopartículas de grafito.

Table 3. Lethal dose (LC_{50} ; 24 hours) in *B. cockerelli* nymphs of lambda cyalotrin at different concentrations of graphite nanoparticles.

Concentraciones de grafito (%)	CL_{50} (mg/L)	LFI	LFS	Ec. Predicción	P-valor	RS
Control	285.528	102.086	666.100	$Y = -1.702 + 0.693$	< 0.000 1	
1	246.296	1.285	2404	$Y = -1.890 + 0.790$	0.001 5	1.15 x
3	48.105	1.063	178.533	$Y = -1.153 + 0.685$	< 0.000 1	5.93 x
5	30.914	13.314	55.956	$Y = -0.824 + 0.552$	< 0.0001	9.23 x
10	13.856	0.00265	76.517	$Y = -0.651 + 0.570$	0.000 2	20.60 x

CL_{50} : Concentración letal media. LFI: Límite fiducial inferior. LFS: Límite fiducial superior. RS: Relación de sinergia en valores de CL_{50} .

partículas de grafito, representando una RS de 8.59 veces (Tabla 4).

La eficacia de las nanopartículas de carbono para reducir la dosis CL_{50} de diferentes insecticidas coincide con otros registros de la literatura. Wang y col. (2019a), reportaron que la actividad sinérgica del óxido de grafeno, en combinación con el insecticida imidacloprid, contra el insecto barrenador asiático del maíz, redujo la CL_{50} a 2.31 mg/L, exhibiendo una toxicidad de contacto de 1.83 veces. El óxido de grafeno sinérgicamente con el insecticida beta-ciflutrina, aplicado al ácaro *Tetranychus urticae*, documentó una CL_{50} de 2.06 mg/L y una RS de 1.50 veces (Wang y

col., 2019b). Batool y col. (2020), registraron que, al utilizar puntos cuánticos de grafeno como nanotransportadores, cargados con cisteína proteasa como insecticida contra *Tribolium castaneum* y *Rhyzopertha dominica*, redujeron el valor de CL_{50} a 0.759 mg/L y 0.771 mg/L, respectivamente. Wang y col. (2019b), evaluaron la mortalidad del ácaro *Tetranychus truncatus*, con el ingrediente clorpirifos en combinación con el óxido de grafeno, reportando una CL_{50} de ingrediente solo de 3.21 mg/L y del nanocompuesto de 2.07 mg/L, indicando que la CL_{50} bajó con la adición de óxido de grafeno, presentando una RS del nanocompuesto para el valor de CL_{50} , 1.55 veces en la actividad insecticida en re-

■ Tabla 4. Dosis letal (CL_{50} ; 24 horas) en ninfas de *B. cockerelli* de dimetoato a diferentes concentraciones de nanopartículas de grafito.

Table 4. Lethal dose (LC_{50} ; 24 hours) in *B. cockerelli* nymphs of dimethoate at different concentrations of graphite nanoparticles.

Concentraciones de grafito (%)	CL_{50} (mg/L)	LFI	LFS	Ec. Predicción	P-valor	RS
Control	492.357	379.235	632.533	$Y = -2.637 + 0.979$	< 0.000 1	
1	282.487	79.330	773.191	$Y = -1.742 + 0.710$	< 0.000 1	1.74 x
3	133.004	28.661	341.736	$Y = -1.726 + 0.812$	< 0.000 1	3.70 x
5	84.670	9.691	249.654	$Y = -1.468 + 0.761$	< 0.000 1	5.81 x
10	57.316	7.589	158.969	$Y = -1.413 + 0.803$	< 0.000 1	8.59 x

CL_{50} : Concentración letal media. LFI: Límite fiducial inferior. LFS: Límite fiducial superior. RS: Relación de sinergia en valores de CL_{50} .

lación con el producto solo. Liu y col. (2022), documentaron la nanoformulación de óxido de grafeno cargado con abamectina contra el insecto dorso de diamante (*Plutella xylostella*), registraron el valor de CL_{50} de 1.503 mg/L para la abamectina sola y una CL_{50} de 0.996 mg/L para abamectina cargada en óxido de grafeno.

Los resultados de este trabajo muestran que las nanopartículas derivadas del carbono presentan un prometedor potencial en el control de diferentes insectos, incluyendo el *B. cockerelli*, al reducir las dosis de los productos químicos.

CONCLUSIONES

Los tres insecticidas mostraron ser eficientes contra ninfas de *B. cockerelli* en el siguiente orden: imidacloprid, lambda cyalotrina y dimetoato. La combinación de los tres compuestos químicos con nanopartículas de grafito se incrementó notablemente a partir de

los tratamientos de 500 mg/L de insecticida al 3 % y 5 % de nanopartículas de grafito. La mejor combinación fue el insecticida imidacloprid-nanopartículas de grafito al 10 % con una dosis letal de 1.96 mg/L y una relación de sinergia de 52.34 %. Las nanopartículas de grafito mostraron ser una alternativa a considerar para incrementar el control de *B. cockerelli* mediante el uso de insecticidas.

AGRADECIMIENTO

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología, por la beca otorgada durante la realización de la estancia posdoctoral en el departamento de parasitología agrícola, dentro del laboratorio de toxicología, perteneciente a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

DECLARACIÓN DE INTERESES

Los autores declararon no tener conflicto de interés alguno.

REFERENCIAS

- Batool, M., Hussain, D., Akrem, A., Najam-ul-Haq, M., Saeed, S., Zaka, S. M., Nawaz, M. S., Buck, F., & Saeed, Q. (2020). Graphene quantum dots as cysteine protease nanocarriers against stored grain insect pests. *Scientific Reports*, 10(1), 3444. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60432-5>.
- Behbudi, G. (2020). Mini review of graphene oxide for medical detection and applications. *Advances in Applied NanoBio-Technologies*, 1(3), 63-66.
- Butler, C. D. & Trumble, J. T. (2012). Identification and impact of natural enemies of *Bactericera cockerelli* (Hemiptera: Trioziidae) in Southern California. *Journal of Economic Entomology*, 105(5), 1509-1519. <https://doi.org/10.1603/EC12051>.

- Chen, Z., Zhao, J., Liu, Z., Bai, X., Li, W., Guan, Z., Zhou, M., & Zhu, H. (2022). Graphene-Delivered Insecticides against Cotton Bollworm. *Nanomaterials*, 12(16), 2731. <https://doi.org/10.3390/nano1216273>.
- Dziewięcka, M., Pawlyta, M., Majchrzycki, Ł., Balin, K., Barteczko, S., Czerkawska, M., & Augustyniak, M. (2021). The structure-properties-cytotoxicity interplay: A crucial pathway to determining graphene oxide biocompatibility. *International Journal of Molecular Sciences*, 22, 5401. <https://doi.org/10.3390/ijms22105401>.
- EPPO, Organización Europea y Mediterránea de Protección de las Plantas (2014). *Bactericera cockerelli* PARZCO. [En línea]. Disponible en: <http://www.eppo.int>. Fecha de consulta: 10 de diciembre de 2024.
- Henderson, C. F. & Tilton, E. W. (1955). Tests with acaricides against the brown wheat mite. *Journal of Economic Entomology*, 48(2), 157-161.
- IRAC, Insecticide Resistance Action Committee (2024). Modes de action. [En línea]. Disponible en: <https://irac-online.org/methods/psylla-spp-all-stages/>. Fecha de consulta: 8 de enero de 2025.
- Kumar, D. & Kalita, P. (2017). Reducing postharvest losses during storage of grain crops to strengthen food security in developing countries. *Foods*, 6(1), 8. <https://doi.org/10.3390/foods6010008>.
- Li, C., Hu, C., Zhi, J., Yue, W., & Li, H. (2022). Effects of nano-graphene oxide on the growth and reproductive dynamics of *Spodoptera frugiperda* based on an age-stage, two-sex life table. *Insects*, 13(10), 929. <https://doi.org/10.3390/insects13100929>.
- Liu, J., Luo, Y., Jiang, X., Sun, G., Song, S., Yang, M., & Shen, J. (2022). Enhanced and sustained pesticidal activity of a graphene-based pesticide delivery system against the diamondback moth *Plutella xylostella*. *Pest Management Science*, 78(12), 5358-5365. <https://doi.org/10.1002/ps.7158>.
- Liu, D. & Trumble, J. T. (2006). Ovipositional preferences, damage thresholds, and detection of the tomato-potato psyllid *Bactericera cockerelli* (Homoptera: Psyllidae) on selected tomato accessions. *Bulletin of Entomological Research*, 96(2), 197-204. <https://doi.org/10.1079/BER2005416>.
- Liu, X., Vinson, D., Abt, D., Hurt, R. H., & Rand, D. M. (2009). Differential toxicity of carbon nanomaterials in *Drosophila*: larval dietary uptake is benign, but adult exposure causes locomotor impairment and mortality. *Environmental Science & Technology*, 43(16), 6357-6363.
- Lozano-Gutiérrez, J., Chávez-Brizuela, A., Lara-Herrera, A., España-Luna, M. P., Balleza-Cadengo, J. D. J. y Hernández-Muñoz, C. A. (2018). Poblaciones de *Bactericera cockerelli* Sulc. 1909 (HEMIPTERA: PSILLIDAE) en 50 cultivares de chile (*Capsicum annum* L.) en Morelos, Zacatecas, México, 5, 354-357. <https://doi.org/10.48779/ba80-a717>.
- Mogul, M. G., Akin, H., Hasirci, N., Trantolo, D. J., Gresser, J. D., & Wise, D. L. (1996). Controlled release of biologically active agents for purposes of agricultural crop management. *Resources, Conservation and Recycling*, 16(1-4), 289-320. [https://doi.org/10.1016/0921-3449\(95\)00063-1](https://doi.org/10.1016/0921-3449(95)00063-1).
- Munyanza, J. E. (2013). *Bactericera cockerelli*. [En línea]. Disponible en: <https://www.ars.usda.gov/research/publications/publication/?seqNo115=289067>. Fecha de consulta: 8 de diciembre de 2024.
- Olanian, O., Rodríguez-Gasol, N., Cayla, N., Michaud, E., & Wratten, S. D. (2020). *Bactericera cockerelli* (Sulc), a potential threat to China's potato industry. *Journal of Integrative Agriculture*, 19(2), 338-349. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62754-1](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62754-1).
- Ramírez-Dávila, J. F., Porcayo-Camargo, E. y Sánchez-Pale, J. R. (2012). Análisis de la distribución espacial de *Bactericera Cockerelli* Sulc (HEMIPTERA: TRIOZIDAE) en *Solanum Tuberosum* L. En *Donato Guerra México*, 12(1), 12-24. <https://hdl.handle.net/10893/4083>.
- Rivera-Martínez, R., Ramírez-Dávila, J. F., Martínez-Quiroz, M. y González-Huerta, A. (2020). Modelización espacial de ninfas de *Bactericera cockerelli* Sulc. en tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) por medio de técnicas geoestadísticas. *Biotecnología*, 22(1), 142-152. <https://doi.org/10.18633/biotecnologia.v22i1.1162>.
- Rodríguez, G. C. y Kharissova, O. V. (2008). Propiedades y aplicaciones del grafeno. *Ingenierías*, 11(38), 17-23.
- SADER, Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (2024). México, entre los principales productores de chile verde en el mundo: agricultura. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/agricultura>. Fecha de consulta: 19 de noviembre de 2024.
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquero (2024). Principales estados productores de chile verde en México: agricultura. [En línea]. Disponible en: siap.gob.mx/cierreagricola/. Fecha de consulta: 18 de noviembre de 2024.

- Trujillo-García, J., Lozano-Gutiérrez, J., España-Luna, M. P., Lara-Herrera, A. y Balleza-Cadengo, J. J. (2018). Parasitismo de *Bactericera cockerelli* (Sulc) (Hemiptera: Psyllidae) en dos cultivares de chile guajillo en invernadero. *Entomología Mexicana*, 5, 160-163. <https://doi.org/10.48779/xm0m-w095>.
- Tucuch-Haas, J. I., Silva-Aguayo, G., & Rodríguez-Maciel, J. C. (2020). Oviposition of *Bactericera cockerelli* (Sulc) (Hemiptera: Triozidae) on *Capsicum chinense* (Jacq) treated with spiromesifen or spirotetramat. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 43(3), 317-323. <https://doi.org/10.35196/rfm.2020.3.317>.
- Vega-Gutiérrez, M. T., Rodríguez-Maciel, J. C., Díaz-Gómez, O., Bujanos-Muñiz, R., Mota-Sánchez, D., Martínez-Carrillo, J. L. y Garzón-Tiznado, J. A. (2008). Susceptibilidad a insecticidas en dos poblaciones mexicanas del salerillo, *Bactericera cockerelli* (Sulc) (Hemiptera: Triozidae). *Agrociencia*, 42(4), 463-471. <https://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v42n4/v42n4a9.pdf>.
- Venugopal, N. V. S. & Sainadh, N. V. S. (2016). Novel polymeric nanoformulation of Mancozeb–An eco-friendly nanomaterial. *International Journal of Nanoscience*, 15(04), 1650016. <https://doi.org/10.1142/S0219581X16500162>.
- Villegas-Rodríguez, F., Marín-Sánchez, J., Delgado-Sánchez, P., Torres-Castillo, J. A., & Alvarado-Gómez, O. G. (2014). Management of *Bactericera cockerelli* (Sulc) (Hemiptera: Triozidae) in greenhouses with entomopathogenic fungi (Hypocreales). *Southwestern Entomologist*, 39(3), 613-624. <https://doi.org/10.3958/059.039.0320>.
- Wang, X., Xu, J., Sun, T., & Ali, S. (2021). Synthesis of Cordyceps fumosorosea-biochar nanoparticles and their effects on growth and survival of *Bemisia tabaci* (Gennadius). *Frontiers in Microbiology*, 12, 630220. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.630220>.
- Wang, X., Xie, H., Wang, Z., & He, K. (2019b). Graphene oxide as a pesticide delivery vector for enhancing acaricidal activity against spider mites. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 173, 632-638. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2018.10.010>.
- Wang, X., Xie, H., Wang, Z., He, K., & Jing, D. (2019a). Graphene oxide as a multifunctional synergist of insecticides against lepidopteran insect. *Environmental Science: Nano*, 6(1), 75-84. <https://doi.org/10.1039/C8EN00902C>.
- Xiang, Y., Wang, M., Sun, X., Cai, D., & Wu, Z. (2014). Controlling pesticide loss through nanonetworks. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2(4), 918-924.



Imagen de Canva educativo

Microencapsulación de jugo de granada y extracto de jamaica: caracterización fisicoquímica, antioxidante y antimicrobiana

Microencapsulation of pomegranate juice and hibiscus extract: physicochemical, antioxidant, and antimicrobial characterization

Brenda Esmeralda Jiménez-Villeda*, Edna Zaranné Martínez-Ramírez, Marithza Guadalupe Ramírez-Gerardo, Erik Gómez-Hernández

RESUMEN

La microencapsulación mejora la estabilidad y disponibilidad de compuestos bioactivos, como polifenoles de fuentes vegetales, para satisfacer la demanda de alimentos funcionales. Este estudio buscó obtener y caracterizar microencapsulados de jugo de granada y extracto de jamaica, evaluando sus propiedades fisicoquímicas, antioxidantes y antimicrobianas. Los microencapsulados se produjeron mediante secado por aspersión a 100 °C, con una velocidad de alimentación de 4 mL/min, en proporciones de jugo de granada y extracto de jamaica: 100:0 (C1), 70:30 (M1), 50:50 (M2), 30:70 (M3) y 0:100 (C2). Se analizaron humedad, actividad de agua, solubilidad, color, morfología, capacidad antioxidante y actividad antimicrobiana al inicio y tras 6 meses de almacenamiento. Los microencapsulados mostraron baja humedad (< 5 %, excepto C1) y actividad de agua (< 0.3), asegurando estabilidad fisicoquímica al limitar reacciones de degradación y crecimiento microbiano. La solubilidad superó el 93 % en todos los tratamientos. Las formulaciones con mayor contenido de extracto de jamaica (M3 y C2) presentaron mayor luminosidad y tonos rojizos. La microscopía electrónica de barrido reveló partículas esféricas con concavidades, sin grietas, típicas del secado por aspersión. Los tratamientos M3 y C2 también exhibieron la mayor capacidad antioxidante, destacando C2 con 4 717.10 mg de Trolox/100 g para ABTS y 4 729.43 mg de equivalente de ácido ascórbico/100 g para DPPH, con inhibiciones del radical del 95.68 % y 80.83 %, respectivamente. Además, M3 y C2, mostraron una inhibición significativa ($P < 0.05$), contra *Escherichia coli*. Tras 6 meses, las propiedades se preservaron parcialmente, especialmente en formulaciones ricas en extracto de jamaica. La microencapsulación de jugo de granada y extracto de jamaica demostró ser una estrategia efectiva para obtener productos con alta solubilidad, actividad antioxidante y antimicrobiana, ideales para aplicaciones en alimentos funcionales.

PALABRAS CLAVE: microencapsulación, jugo de granada, extracto de jamaica, capacidad antioxidante, actividad antimicrobiana.

ABSTRACT

Microencapsulation enhances the stability and bioavailability of bioactive compounds, such as polyphenols from plant sources, to meet the demand for functional foods. This study aimed to produce and characterize microencapsulated pomegranate juice and hibiscus extract, evaluating their physicochemical, antioxidant, and antimicrobial properties. Microencapsulates were obtained by spray drying at 100 °C with a feed rate of 4 mL/min, using pomegranate juice and hibiscus extract ratios of 100:0 (C1), 70:30 (M1), 50:50 (M2), 30:70 (M3), and 0:100 (C2). Humidity, water activity, solubility, color, morphology, antioxidant capacity, and antimicrobial activity were assessed initially and after 6 months of storage. The microencapsulates exhibited low humidity (< 5 %, except C1) and water activity (< 0.3), ensuring physicochemical stability by limiting degradation reactions and microbial growth. Solubility exceeded 93 % across all treatments. Formulations with higher hibiscus extract content (M3 and C2) showed greater luminosity and reddish hues. Scanning electron microscopy revealed spherical particles with concavities, without cracks, typical of spray drying. Also, the M3 and C2 treatments displayed the highest antioxidant capacity, with C2 recording 4 717.10 mg Trolox/100 g for ABTS and 4 729.43 mg ascorbic acid equivalent/100 g for DPPH, with radical inhibitions of 95.68 % and 80.83 %, respectively. Besides, the M3 and C2 treatments showed significant inhibition ($P < 0.5$) against *Escherichia coli*. After 6 months, properties were partially preserved, especially in rich in hibiscus extract formulations. Microencapsulation of pomegranate juice and hibiscus extract proved effective in producing products with high solubility, antioxidant activity, and antimicrobial properties, making them suitable for functional food applications.

KEYWORDS: microencapsulation, pomegranate juice, hibiscus extract, antioxidant capacity, antimicrobial activity.

*Correspondencia: bjimenez@itsoeh.edu.mx/Fecha de recepción: 28 de enero de 2025/Fecha de aceptación: 8 de mayo de 2025/Fecha de publicación: 30 de mayo de 2025.

TecNM/Instituto Tecnológico Superior del Occidente del Estado de Hidalgo, Departamento de Ingeniería en Industrias Alimentarias, carretera Mixquiahuala-Tula km 2.5, Paseo del Agrarismo núm. 2000, Mixquiahuala de Juárez, Hidalgo, México, C. P. 42700.

INTRODUCCIÓN

La producción de fruto de granada (*Punica granatum* L.) en México es amplia por su adaptabilidad a las condiciones climáticas y edáficas; su consumo es mayormente en fresco o bien, es la materia prima para fabricar licores y jugos a nivel artesanal (Betanzos-Cabrera y col., 2015). No obstante, su aprovechamiento se limita a la época de producción (del mes de julio hasta principios del mes de octubre) que es de aproximadamente tres meses por año. El jugo del fruto ha sido estudiado en diversas aplicaciones biológicas debido a la presencia de compuestos bioactivos, como los elagitaninos, punicalagina, punicalina, ácido punícico y ácido elágico, los cuales tienen efectos beneficiosos para la salud humana y han sido evaluados en ensayos *in vitro* e *in vivo* para contrarrestar ciertas enfermedades, como el cáncer, la obesidad, la diabetes, algunos virus como la influenza, infecciones bacterianas e inflamación (Haidari y col., 2009; Khajebishak y col., 2019; Mortada y col., 2020).

La jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.), es una especie ampliamente cultivada en regiones tropicales a nivel mundial (Archaina y col., 2019). Su versatilidad y propiedades funcionales han favorecido su incorporación en diversos productos de la industria alimentaria, incluyendo bebidas, mermeladas, jaleas, licores y harinas para repostería (Borrás-Linares y col., 2015; Archaina y col., 2019;). Diversos estudios han demostrado que *H. sabdariffa* posee efectos benéficos para la salud, atribuidos principalmente a su alta actividad antioxidante. Dicha propiedad está relacionada con la presencia de compuestos bioactivos, como ácidos fenólicos y antocianinas, los cuales desempeñan un papel clave en la neutralización de especies reactivas de oxígeno (Borrás-Linares y col., 2015; Maciel y col., 2018; Vargas-León y col., 2018; Archaina y col., 2019).

La granada (*P. granatum*) y la jamaica (*H. sabdariffa*) presentan actividad antioxidante y antimicrobiana contra patógenos de importancia médica y alimentaria, como *Enteroco-*

ccus faecalis, *Escherichia coli*, *Salmonella typhi*, *Shigella flexneri* y *Staphylococcus aureus*, entre otros (Betanzos-Cabrera y col., 2015; Borrás-Linares y col., 2015). Sin embargo, los compuestos bioactivos de los extractos de granada y jamaica tienen una alta susceptibilidad a la degradación, debido a factores como la temperatura, la luz y el oxígeno, lo que limita su estabilidad y funcionalidad en aplicaciones industriales (Jafari y col., 2017; Archaina y col., 2019).

La microencapsulación representa una estrategia efectiva para mejorar la estabilidad y funcionalidad de compuestos bioactivos sensibles a factores ambientales. En el caso del jugo de granada y el extracto de jamaica, el proceso de secado por aspersión ha demostrado ser efectivo para proteger sus compuestos fenólicos y antioxidantes frente a la degradación por temperatura, luz y oxígeno (Ribeiro y col., 2020). Además, facilita su incorporación en productos alimentarios, mejorando su biodisponibilidad y prolongando su vida útil. Diversos estudios han explorado el uso de matrices encapsulantes como malto-dextrinas (MD) y gomas naturales para optimizar la retención de estos compuestos, obteniendo microcápsulas con propiedades físico-químicas adecuadas para su aplicación industrial (Archaina y col., 2019; Álvarez-Cervantes y col., 2021). Durante el proceso de secado por aspersión, se mezclan los componentes del núcleo (los compuestos bioactivos) y los componentes de la pared (polisacáridos y proteínas) para crear una emulsión que luego se atomiza en una cámara de secado (Dhakal y He, 2020). Ello permite procesar materiales líquidos, como los jugos, que son sensibles al calor, sin afectar significativamente su calidad, además de ser una técnica de microencapsulación económica (Ye y col., 2018).

Archaina y col. (2019), microencapsularon un extracto de jamaica mediante secado por aspersión, reportando que las matrices de MD y goma arábiga (GA) fueron una buena opción para producir polvos de jamaica con ex-

celentes propiedades físicas: bajo contenido de humedad ($< 1.7 \text{ g H}_2\text{O}/100 \text{ g}$ de muestra de peso seco) y actividad de agua (< 0.26); alta temperatura de transición vítrea ($42 \text{ }^\circ\text{C}$ a $48 \text{ }^\circ\text{C}$) y alta solubilidad ($> 99 \%$). Los polvos mostraron baja cohesividad y buena fluidez. Además de retener eficazmente las antocianinas, polifenoles y la capacidad antioxidante.

El objetivo del presente trabajo fue obtener un microencapsulado a partir del jugo de granada madura (*P. granatum*) adicionado con extracto de jamaica (*H. sabdariffa*) mediante secado por aspersión, con el fin de evaluar sus propiedades fisicoquímicas, antioxidantes y su actividad antimicrobiana frente a *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes* y *Salmonella typhimurium*.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materia prima

Se recolectaron granadas maduras (*Punica granatum* L.) en el Valle de Mezquital, Hidalgo, México, entre los meses de julio y septiembre de 2024. Los cálices secos de jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) se obtuvieron de un mercado en Tula de Allende, Hidalgo, México.

Reactivos químicos

Se emplearon GA E-414 (Diquitra®, Estado de México, México) y MD 20 DE (Cazel®, Oaxaca, México) como materiales de pared. Los reactivos fenol Folin-Ciocalteu, 2, 2-difenil-1-picrilhidrazilo (DPPH•), ácido 6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcromano-2-carboxílico (Trolox) y persulfato de potasio ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$) se adquirieron de Sigma-Aldrich (St. Louis, MO, EE. UU.). El citrato de sodio se obtuvo de Golden Bell Reactivos (Ciudad de México, México). El Agar para métodos estándar y caldo de soya triptica-seína fueron de la marca DB Bioxon®.

Obtención del jugo de granada

Las granadas se lavaron cuidadosamente frotando la superficie con una solución de agua potable y jabón en el laboratorio, posteriormente se cortaron por la mitad para extraer el jugo, utilizando un exprimidor mecánico para cítricos. El jugo obtenido se filtró

con un colador fino para remover partículas sólidas; se sometió a un proceso de pasteurización ($85 \text{ }^\circ\text{C}$ por 15 min) y se almacenó en condiciones de refrigeración a $4 \text{ }^\circ\text{C}/24 \text{ h}$, asegurando su protección contra la exposición a la luz en envases ámbar.

Extracto acuoso de jamaica

Se elaboró un extracto a partir de cálices secos de jamaica (15% p/v), mezclando 15 g de cálices con 100 mL de agua destilada y manteniendo la solución a $100 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 10 min. El extracto se filtró al vacío 2 veces utilizando papel Whatman N° 2, siguiendo el procedimiento descrito por Archaina y col. (2019) y se almacenó en condiciones de refrigeración a $4 \text{ }^\circ\text{C}/24 \text{ h}$, protegido de la luz en envases ámbar.

Preparación de las formulaciones

Se combinaron el jugo de granada y el extracto de jamaica (JG:EJ) utilizando proporciones específicas de 100:0 (C1), 70:30 (M1), 50:50 (M2), 30:70 (M3) y 0:100 (C2), expresadas en términos de porcentaje en volumen.

Las soluciones fueron combinadas con una proporción 85:15 de MD y GA, respectivamente, y ajustadas a un contenido de sólidos totales del 30% (p/v). Las soluciones se sometieron a agitación magnética durante 10 min para dispersar los hidrocoloides y se homogenizaron a 6 000 rpm durante 5 min con homogenizador Ultra Turrax T-25 SI (IKA Works, Wilmington, NC, EE. UU.).

Secado por aspersión

La microencapsulación se llevó a cabo mediante un secador por aspersión de laboratorio modelo Buchi B-191 (Labortechnik AG, Flawil, Suiza). Se utilizó temperatura de entrada de $100 \text{ }^\circ\text{C}$ y temperatura de salida de $62 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. El flujo de líquido (velocidad de alimentación) se mantuvo constante a $4 \text{ mL}/\text{min}$, utilizando una boquilla de 0.5 mm de diámetro y la presión del aire se ajustó a 3.0 bar. Los polvos obtenidos se almacenaron herméticamente en bolsas de plástico a $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta su análisis.

Caracterización de encapsulados de jugo de granada y extracto de jamaica

Contenido de humedad

La determinación del contenido de humedad en las microcápsulas se realizó siguiendo el método 44-15.02 (AACC, 2000). Se pesaron 2 g de muestra y se distribuyeron en charolas de aluminio, posteriormente se sometieron a un proceso de secado en una estufa (Biobase, BOV-D125, China) a una temperatura de 105 °C/24 h. El contenido de humedad se estimó mediante la diferencia del peso antes y después del secado de la muestra, de acuerdo con la ecuación 1:

$$\% \text{ de humedad} = \frac{\text{peso inicial} - \text{peso final}}{\text{peso inicial}} \times 100 \quad (1)$$

Actividad de agua (aw)

Se empleó un equipo Aqua Lab (LITE, Washington, EE. UU.) que opera bajo el principio de equilibrio de presión de vapor. Las muestras se colocaron en contenedores propios del equipo, y la medición se realizó a temperatura ambiente (± 25 °C).

Solubilidad

Se vertieron 100 mL de agua destilada en un recipiente de vidrio. Posteriormente, se pesó cuidadosamente 1 g del polvo y se añadió al recipiente a temperatura ambiente (± 25 °C). La solución resultante se agitó inmediatamente utilizando un homogeneizador Ultra Turrax T-25 SI (IKA Works, Wilmington, NC, EE. UU.) a 15 000 rpm durante 3 min. Luego, se centrifugó (Sigma, modelo 3-30 k, Alemania), a 3 000 rpm durante 5 min a temperatura ambiente (± 25 °C). El sobrenadante se vertió cuidadosamente en placas limpias y previamente pesadas, las cuales se secaron en una estufa a 105 °C/5 h hasta alcanzar un peso constante. El peso de la materia seca fue utilizado como base para calcular la solubilidad del polvo.

Color

Se empleó la escala de color CIE L^* C^* H^* utilizando un analizador de color portátil (Kaalee, WR10QC, China). Las muestras se

prepararon homogéneamente y se colocaron en una superficie uniforme para la medición. El dispositivo registró los valores L^* (luminosidad), a^* (verde-rojo) y b^* (azul-amarillo). Posteriormente, se calcularon los valores de C^* (croma) y H^* (tono o matiz) de acuerdo con las ecuaciones 2 y 3:

$$C^* = \sqrt{(a^{*2} + b^{*2})} \quad (2)$$

$$H^* = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \quad (3)$$

Morfología de las microcápsulas

La morfología de las microcápsulas se observó con un microscopio electrónico de barrido (SEM, por sus siglas en inglés: Scanning Electron Microscope) (model JEOL JSM-6300, Akishima, Tokyo, Japan). Las muestras secas se colocaron en un portaobjetos recubierto con cinta electroconductora de carbono de doble cara, y posteriormente se recubrieron con una capa de oro de 0.5 nm a 1 nm de espesor durante 3 min. Las observaciones se realizaron bajo condiciones de 15 A y 20 kV.

Capacidad antioxidante

Acondicionamiento de la muestra

Para cuantificar la capacidad antioxidante de las microcápsulas mediante las técnicas ABTS y DPPH, se llevó a cabo la destrucción completa de su estructura. Se pesaron 200 mg de microcápsulas en un tubo Eppendorf, a los cuales se añadieron 2.0 mL de agua. La mezcla fue agitada vigorosamente durante 5 min, y posteriormente centrifugada a 7 000 $\times g$ (MiniSpin plus, Eppendorf, Alemania) durante 10 min. El sobrenadante obtenido se filtró a través de un filtro de membrana con un tamaño de poro de 0.45 μm , y el filtrado resultante se utilizó para las pruebas de ABTS y DPPH.

ABTS

La capacidad de captación del radical ABTS fue evaluada de acuerdo con lo descrito por Martínez-Ramírez y col. (2024) con algunas modificaciones. El radical se generó median-

te la reacción del ácido 2,2'-azino-bis (3-etil-benzotiazolina-6-sulfónico) (ABTS) a una concentración de 7 mM con $K_2S_2O_8$ (2.45 mM), incubándose a temperatura ambiente en ausencia de luz durante 16 h. Posteriormente, se mezclaron 1 050 μ L de la solución del radical con 50 μ L de la solución del microencapsulado (cápsulas disueltas en una solución de citrato de sodio al 2 %). Después, la mezcla se agitó en vórtex durante 2 min con un vortex Velp Scientifica XZ3 (Monza y Brianza, Italia) y se centrifugó a 10 000 rpm durante 3 min con una centrífuga Eppendorf 5804R (Hamburgo, Alemania), permitiendo que la mezcla reaccionara durante 30 min en oscuridad. La absorbancia se midió a 732 nm; los resultados se expresaron en miligramos de equivalentes de Trolox (mg ETrolox/100 g de muestra de peso seco). La inhibición del radical ABTS se calculó de acuerdo a la ecuación 4.

$$\% \text{ inhibición} = \frac{Abs_{inicial_{ABTS}} - Abs_{final_{ABTS}}}{Abs_{inicial_{ABTS}}} \times 100 \quad (4)$$

Donde:

Abs inicial_{ABTS} = Absorbancia del radical ABTS antes de la reacción con la muestra.

Abs final_{ABTS} = Absorbancia del radical ABTS después de la reacción con la muestra.

DPPH

La capacidad de reducción del radical estable DPPH de los microencapsulados fue determinada utilizando 1 050 μ L del radical estable 2,2-difenil-1-picrilhidrazina (DPPH), que reaccionó con 50 μ L del microencapsulado durante 30 min en la oscuridad, siguiendo los métodos de Martínez-Ramírez y col. (2024). La absorbancia fue medida a 515 nm, y los resultados se expresaron en miligramos de equivalentes de ácido ascórbico (mg EA.A/100 g de peso seco). La inhibición del radical DPPH se calculó de acuerdo a la ecuación 5.

$$\% \text{ inhibición} = \frac{Abs_{inicial_{DPPH}} - Abs_{final_{DPPH}}}{Abs_{inicial_{DPPH}}} \times 100 \quad (5)$$

Donde:

Abs inicial_{DPPH} = Absorbancia del radical DPPH antes de la reacción con la muestra.

Abs final_{DPPH} = Absorbancia del radical DPPH después de la reacción con la muestra.

Estabilidad fisicoquímica de los microencapsulados a temperatura ambiente

Las muestras de los diferentes tratamientos se almacenaron a temperatura ambiente (aproximadamente 25 °C) y humedad relativa constante, evitando la exposición a la luz directa, durante un periodo de hasta 6 meses, para determinar cambios en la capacidad antioxidante de los polvos.

Actividad antimicrobiana de los polvos

La actividad antimicrobiana de los tratamientos microencapsulados de jugo de granada y extracto de jamaica se evaluó mediante el método de difusión en pozos, basado en Borrás-Linares y col. (2015) con modificaciones. Se utilizaron 100 μ L de suspensiones de *Escherichia coli*, *Salmonella typhimurium* y *Listeria monocytogenes*, cultivadas en caldo de soya tripticaseína a 37 °C/24 h. Tras el cultivo, las células fueron lavadas y resuspendidas en solución salina estéril (NaCl, 0.9 %) hasta alcanzar una densidad óptica a 660 nm (OD660) de 0.5, equivalente a 6 log UFC/mL. Cada suspensión se inoculó en agar por vertido y, tras la solidificación, se perforaron pozos de 6 mm de diámetro. En cada pozo se depositaron 50 μ L de las cápsulas disueltas en una solución de citrato de sodio al 2 %. Luego de la absorción del líquido, las placas se incubaron a 37 °C/24 h, y finalmente, se midieron los diámetros de las zonas de inhibición en milímetros.

Análisis estadístico

Todos los análisis se llevaron a cabo por triplicado. El procesamiento estadístico de los datos se realizó con el software Statistica, versión 7.0, StatSoft (2009). Se aplicó un análisis de varianza de una vía (ANOVA) seguido de la prueba de comparación múltiple de Tukey ($P < 0.05$).

RESULTADOS

Obtención de microencapsulados de jugo de granada y extracto de jamaica

El proceso de microencapsulación mediante

secado por aspersión demostró ser una opción de proceso efectiva, que permitió obtener cinco muestras en forma de polvos finos, fáciles de manipular, con consistencia suave y granular y sin signos de apelmazamiento, lo cual puede atribuirse a la temperatura de entrada (100 °C) utilizada en el secador y que, además está estrechamente relacionada con el rendimiento del proceso, ya que influye directamente en la transferencia de calor y masa (Díaz-López y col., 2023).

Caracterización de las microcápsulas

Humedad

Los niveles de humedad iniciales fueron inferiores a 5 % excepto para la muestra (C1) (Tabla 1), valor considerado aceptable (Rodríguez y col., 2017) por influir favorablemente en la estabilidad de los compuestos microencapsulados (Álvarez-Cervantes y col., 2021).

El contenido de humedad de todas las muestras aumentó después de 6 meses, lo que indica una reabsorción de agua desde el am-

biente, fenómeno esperado en productos secos almacenados sin un control adecuado de la humedad relativa. Los tratamientos C1 y M1, ambos con contenido predominante de jugo de granada, alcanzaron valores de 8.03 % y 5.56 %, respectivamente, valores por encima de lo recomendado y que se asocia con pérdida de la estabilidad estructural y funcional de los microencapsulados. La mayor capacidad de absorción de agua del jugo de granada puro podría deberse a su alto contenido de compuestos hidrofílicos.

Las muestras que contenían extracto de jamaica, como M2, M3 y C2, mantuvieron un contenido de humedad por debajo de 5 % al término de los 6 meses, lo que indica que la incorporación de jamaica podría tener un efecto positivo en la reducción de la absorción de humedad. Este comportamiento es consistente con estudios previos que sugieren que los compuestos polifenólicos y la fibra, presentes en la jamaica, podrían contribuir a una mayor estabilidad en condiciones de almacenamiento (Tonon y col., 2010).

■ Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas de los microencapsulados de jugo de granada y extracto de jamaica después del secado y tras 6 meses de almacenamiento.

Table 1. Physicochemical properties of pomegranate juice and hibiscus extract microcapsules after drying and after 6 months of storage

Tratamientos (JG:EJ)	Humedad (%)	Actividad de agua	Solubilidad (%)
C1, 100:0	6.62 ± 0.16 ^c	0.29 ± 0.02 ^a	93.77 ± 0.25 ^a
M1, 70:30	4.40 ± 0.32 ^b	0.26 ± 0.01 ^a	94.73 ± 0.15 ^{ab}
M2, 50:50	3.69 ± 0.16 ^a	0.27 ± 0.02 ^a	95.66 ± 0.19 ^{bc}
M3, 30:70	3.22 ± 0.11 ^a	0.27 ± 0.00 ^a	94.63 ± 0.13 ^{ab}
C2, 0:100	3.24 ± 0.30 ^a	0.27 ± 0.01 ^a	96.32 ± 0.90 ^c
Después de 6 meses de almacenamiento			
C1, 100:0	8.03 ± 0.20 ^d	0.32 ± 0.01 ^a	92.80 ± 0.35 ^b
M1, 70:30	5.56 ± 0.29 ^c	0.29 ± 0.01 ^a	93.67 ± 0.40 ^a
M2, 50:50	4.58 ± 0.11 ^b	0.30 ± 0.00 ^a	94.28 ± 0.38 ^a
M3, 30:70	4.09 ± 0.18 ^{ab}	0.29 ± 0.01 ^a	93.71 ± 0.16 ^a
C2, 0:100	3.96 ± 0.14 ^a	0.30 ± 0.02 ^a	95.46 ± 0.10 ^c

JG: jugo de granada, EJ: extracto de jamaica. Promedio de tres repeticiones ± desviación estándar. C1 y C2: controles. M1, M2 y M3: mezclas. ^{a, b, c}Valores con letras minúsculas diferentes en la misma columna expresan diferencia estadísticamente significativa (P < 0.05), prueba de Tukey.

Actividad del agua

El valor de actividad de agua (a_w) representa la fracción de agua libre, disponible en el sistema. Los valores de a_w en todos los tratamientos fueron inferiores a 0.3 (Tabla 1), valor que se considera adecuado para mantener la estabilidad del polvo y prolongar su vida útil (Reyes y col., 2018). Este nivel de a_w indica una limitada cantidad de agua libre disponible para participar en reacciones bioquímicas, fisicoquímicas y el desarrollo microbiano, entre otras, y que deterioran la calidad del producto, reduciendo el riesgo de degradación fisicoquímica, el desarrollo microbiano, pardeamiento enzimático, reacciones hidrolíticas, oxidación lipídica y enzimáticas durante el almacenamiento (Marques y col., 2007; Archaina y col., 2019). Los valores obtenidos son similares a los reportados por Hernández-López y col. (2018), quienes usaron también una temperatura de entrada de 100 °C, para microencapsular *Lactobacillus pentosus*, utilizando como pared una matriz de pulque y almidón. A esta condición de secado se genera una transferencia de calor en las partículas que incrementa la fuerza motriz de la evaporación y que favorece una mayor eliminación de agua, resultando en polvos con un menor contenido de humedad (Daza y col., 2016).

Después de 6 meses de almacenamiento, los 5 tratamientos registraron un aumento en la a_w , asociado con el mayor contenido de humedad (Tabla 1), sin que se alcanzara, aparentemente un cambio del estado vítreo que se manifiesta con la presencia de aglomeración de las partículas o la degradación estructural de la matriz encapsulante (Jafari y col., 2017). Archaina y col. (2019) reportaron valores de a_w similares (0.33) en microencapsulados de jamaica obtenidos mediante secado por aspersión que mantuvieron su estructura en almacenamiento.

Solubilidad

La solubilidad de todos los tratamientos de microencapsulados se presentó por encima del 93 % (Tabla 1), lo cual se puede atribuir

a que el uso de MD con un valor alto de equivalente de dextrosa (DE) mejora la reconstitución de los polvos (Archaina y col., 2019). El valor fue mayor ($P < 0.05$) para el control de extracto de jamaica (C2), que para el de jugo de granada (C1). Después de 6 meses de almacenamiento la solubilidad descendió ligeramente en todas las muestras, aunque la mayoría conservaron su solubilidad por encima del 93 %. Los tratamientos con extracto de jamaica preservaron mejor la solubilidad, esto debido probablemente a la mayor presencia de compuestos fenólicos, que pueden interactuar con los agentes encapsulantes y darle estabilidad del polvo (Nguyen y col., 2022).

La solubilidad es un factor esencial para evaluar el comportamiento de un producto en fase acuosa y constituye un criterio fundamental para determinar la calidad de reconstitución de los polvos (Choudhury y col., 2021). Para los consumidores, la capacidad de los productos en polvo, de disolverse de manera rápida y completa, representa uno de los principales indicadores de calidad. Diversos factores pueden influir en esta propiedad, entre ellos, la composición inicial de la materia prima destinada al secado por aspersión, los agentes portadores, las tasas de flujo de aire comprimido y las bajas velocidades de alimentación (Jafari y col., 2017).

Color

Las proporciones de jugo de granada (M1) y extracto de jamaica (M3), tuvieron los mismos valores en L^* (luminosidad), lo cual, posiblemente afectó los valores de H^* (tono o matiz) (Tabla 2). Este fenómeno se puede explicar mediante la interacción de factores como la concentración de compuestos naturales en las materias primas y los efectos térmicos durante el proceso de secado. El tratamiento C1 (100:0, granada: jamaica) presentó un H^* de 20.31, indicando un tono rojo menos intenso que el tratamiento C2 (0:100 granada: jamaica) con valor de 4.89, que sugiere un tono rojo más puro. En las soluciones de jugo de granada y extracto de jamaica se observó una

■ Tabla 2. Comparación de los valores promedio de color de los diferentes tratamientos de jugo de granada y extracto de jamaica en polvo, después del secado y tras 6 meses de almacenamiento.

Table 2. Comparison of the average color values of different treatments of pomegranate juice and hibiscus extract powders, after drying and after 6 months of storage.

Tratamientos (JG:EJ)	Color		
	L*	C*	H*
C1, 100:0	45.71 ± 0.00 ^a	5.56 ± 0.08 ^b	20.31 ± 0.32 ^c
M1, 70:30	55.50 ± 2.97 ^b	17.96 ± 1.40 ^c	10.07 ± 0.97 ^a
M2, 50:50	50.31 ± 0.78 ^c	24.10 ± 0.79 ^d	10.36 ± 0.48 ^a
M3, 30:70	58.69 ± 0.95 ^b	30.43 ± 1.06 ^a	9.09 ± 1.60 ^a
C2, 0:100	45.41 ± 1.31 ^a	31.74 ± 3.09 ^a	4.89 ± 3.60 ^b
Después de 6 meses de almacenamiento			
C1, 100:0	95.68 ± 0.18 ^e	4.81 ± 0.22 ^a	23.67 ± 1.17 ^c
M1, 70:30	89.83 ± 0.15 ^d	16.01 ± 0.78 ^b	11.76 ± 1.59 ^a
M2, 50:50	72.63 ± 0.22 ^c	21.33 ± 0.17 ^c	12.89 ± 0.37 ^a
M3, 30:70	69.78 ± 0.14 ^b	24.82 ± 0.22 ^d	10.54 ± 1.20 ^a
C2, 0:100	61.51 ± 0.17 ^a	29.09 ± 0.22 ^e	1.06 ± 0.77 ^b

JG: jugo de granada, EJ: extracto de jamaica. Promedio de tres repeticiones ± desviación estándar. C1 y C2: controles. M1, M2 y M3: mezclas. ^{a, b, c}Valores con letras minúsculas diferentes en la misma columna expresan diferencia estadísticamente significativa ($P < 0.05$), prueba de Tukey. L*: Luminosidad, C*: Croma, H*: Tono o matiz.

tendencia clara: a mayor proporción de extracto de jamaica, el matiz (H*) se desplazó hacia tonos más rojos. Esta variación puede atribuirse a la mayor concentración de antocianinas y otros compuestos fenólicos como en el extracto de jamaica, que influyen en la percepción del color. Estudios recientes han demostrado que la estabilidad y el tono del color en productos de granada están también directamente relacionados con la concentración de estos compuestos. Además, la interacción de las antocianinas con otros componentes puede afectar el matiz percibido en productos derivados de este fruto (Türkyılmaz y col., 2023).

El valor del parámetro C* fue significativamente superior ($P < 0.05$) en los tratamientos M3 y C2 en comparación con C1 (Tabla 2). Este incremento se relaciona con el aumento en la proporción de extracto de jamaica en la solución, lo cual indica una intensificación del tono rojizo de los polvos. Dicho comportamiento es consistente con estudios previos

que sugieren que el extracto de jamaica, rico en antocianinas, produce colores rojos intensos (Archaina y col., 2019).

Los dos tratamientos control (C1 y C2) presentaron un valor similar de L* (≈ 45) que fue superior en los tratamientos con combinaciones de ambos productos (50 a 58) (Tabla 2) sugiriendo un efecto aditivo entre ambos.

Los parámetros de H* registraron una tendencia decreciente conforme aumentó la proporción de extracto de jamaica ($P < 0.05$). El tratamiento C1 presentó el valor más alto de H*, lo cual indica una tonalidad más cercana al rojo-anaranjado. En contraste, el tratamiento C2 registró el valor más bajo, reflejando un tono rojo más puro (Tabla 2). También el parámetro C* mostró una tendencia a disminuir ($P < 0.05$) su valor durante el almacenamiento en todas las muestras que contenían jugo de granada, lo que sugiere la degradación parcial de antocianinas y otros pigmentos. Este fenómeno es consistente con

lo reportado por Tonon y col. (2010), quienes indicaron que la estabilidad del color en polvos microencapsulados depende del tipo de material encapsulante y de las condiciones de almacenamiento.

Los valores de L^* aumentaron en todos los tratamientos después de 6 meses, indicando coloración más clara, un fenómeno asociado a la oxidación de pigmentos debido a reacciones de degradación térmica y oxidativa (Jafari y col., 2017). El tratamiento C1 mostró el mayor incremento en L^* (95.68 ± 0.18), al igual que M1 (89.83 ± 0.15) lo que sugiere una pérdida significativa del color característico de la granada. En contraste, la muestra con mayor proporción de extracto de jamaica (M3) presentó la menor pérdida, lo que podría atribuirse a la mayor estabilidad de sus antocianinas jamaica, en comparación con las de la granada, como se ha documentado en estudios sobre la estabilidad de antocianinas en diferentes matrices alimentarias (Türkyılmaz y col., 2023).

El color del microencapsulado es un factor visual importante, que influye en la aceptación del consumidor (Jiménez-González y Guerrero-Beltrán, 2021), aunque también debe considerarse la percepción del color después de reconstituir el microencapsulado en un producto final, y su impacto en la apariencia y aceptación sensorial global. Sin embargo, adicional a esta percepción sensorial, los cambios de color asociados con el almacenamiento de las muestras sugieren la oxidación de los pigmentos y podría ser un indicador de la pérdida de otras propiedades funcionales deseables de sus compuestos bioactivos (Türkyılmaz y col., 2023).

Morfología de las microcápsulas

Las micrografías obtenidas mediante SEM, reflejaron que los polvos de los diferentes tratamientos de jugo de granada y extracto de jamaica están compuestos de micropartículas de diámetro variable (Figura 1) que muestran morfologías típicas de polvos secados por aspersión, como esferas arrugadas carac-

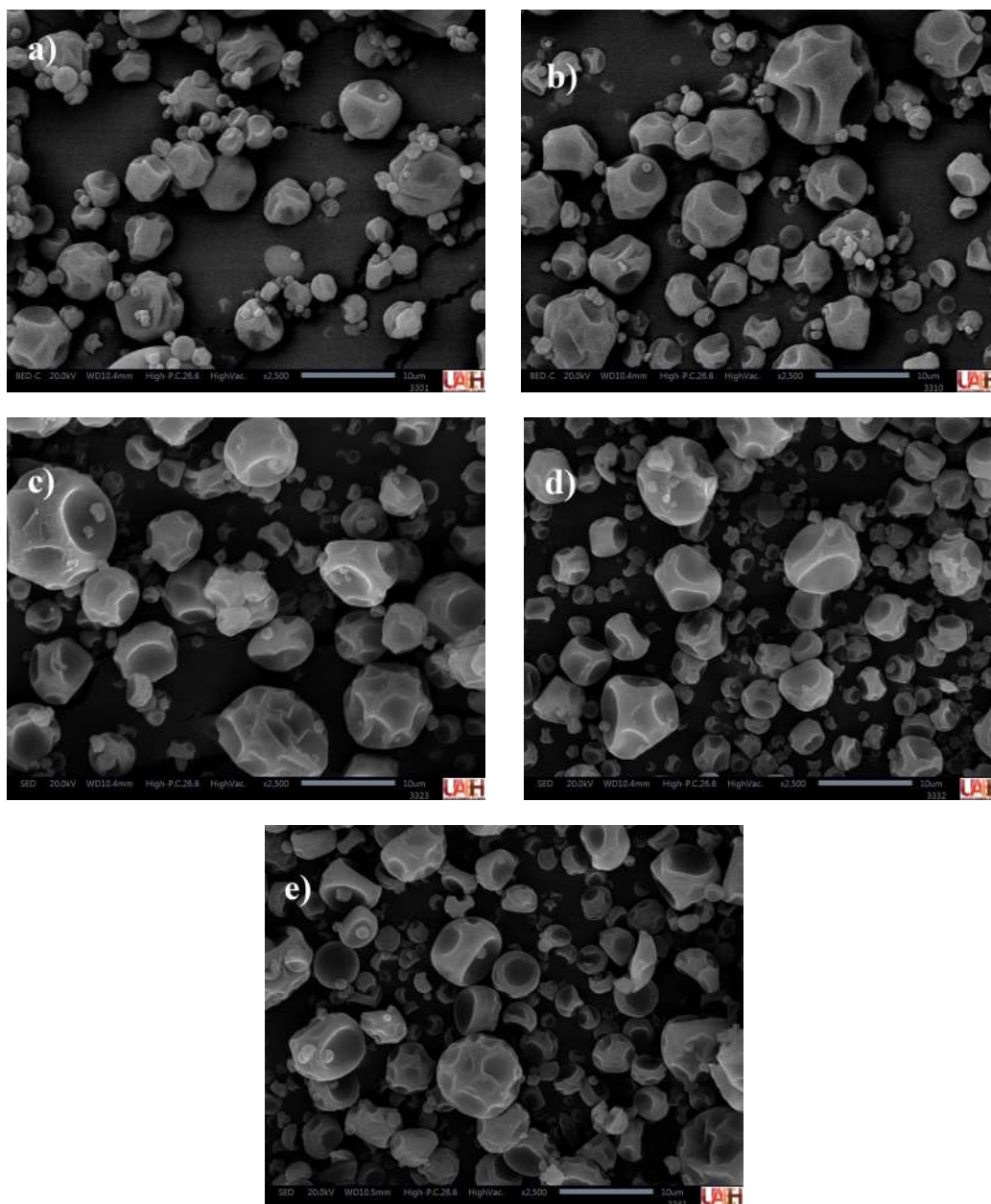
terizadas por numerosas y grandes concavidades formadas durante la rápida evaporación de las gotas de líquido (Tatasciore y col., 2024). Los parámetros del secador por aspersión, como la temperatura, la velocidad de alimentación y la composición de la solución encapsulante, influyen significativamente en la forma de los polvos (Rezende y col., 2018).

Las micropartículas obtenidas en este estudio presentaron superficies externas intactas, sin grietas ni complicaciones visibles, lo que indica una excelente capacidad de la MD y GA para formar películas protectoras. Además, se observaron microcápsulas con tamaños que varían entre $4 \mu\text{m}$ y $15 \mu\text{m}$. Tonon y col. (2008) también obtuvieron microcápsulas de tamaños pequeños, concluyendo que las partículas de menor tamaño se generan al utilizar temperaturas más bajas en el aire de entrada ($< 124^\circ\text{C}$), ya que esto favorece una mayor contracción. Un comportamiento similar fue observado por Jafari y col. (2017), quienes microencapsularon jugo de granada utilizando MD como material encapsulante.

Capacidad antioxidante

La prueba de captación del radical ABTS, mostró que el tratamiento control C1 alcanzó una concentración de $2\,563.47 \text{ mg}$ de ETrolox/100 g de muestra de peso seco, con un porcentaje de inhibición del 60.45 %. Esta técnica evalúa la transferencia de electrones (hidrógenos), permitiendo la detección de antioxidantes presentes en la muestra. En el caso del radical DPPH, el mismo control presentó una concentración de 534.31 mg EA.A/100 g de muestra de peso seco y una inhibición del 19.92 %. Estos resultados sugieren que el jugo de granada, por sí solo (C1), posee una capacidad antioxidante significativa.

El tratamiento control C2 alcanzó una concentración de $4\,717.10 \text{ mg}$ de ETrolox/100 g de muestra de peso seco, con un porcentaje de inhibición del 95.68 %; y de $4\,729.43 \text{ mg}$ EA.A/100 g de muestra de peso seco, con inhibición del 80.83 %, ambos valores significativamente mayores ($P < 0.05$) respecto a los alcanzados por



■ Figura 1. Micrografías de microcápsulas obtenidas a partir de tratamientos de jugo de granada y extracto de jamaica (JG:EJ) en diferentes proporciones a) C1 (100:0), b) M1 (70:30), c) M2 (50:50), d) M3 (30:70) y e) C2 (0:100), respectivamente.

Figure 1. Micrographs of microcapsules obtained from treatments of pomegranate juice and hibiscus extract (PJ:HE) in different proportions a) C1 (100:0), b) M1 (70:30), c) M2 (50:50), d) M3 (30:70) and e) C2 (0:100), respectively.

el jugo de granada (Tabla 3). Al incrementar la proporción de extracto de jamaica en las tres mezclas, se observó un aumento en la actividad antioxidante e inhibitoria para ABTS y DPPH, con un rendimiento superior al del tratamiento C1.

El efecto antioxidante observado puede atribuirse a los metabolitos secundarios presentes en la granada y la jamaica. En particular, estudios previos han reportado que *P. granatum* contiene compuestos bioactivos como elagitaninos, punicalagina, punicalina, ácido

■ Tabla 3. Actividad antioxidante de los diferentes tratamientos con jugo de granada y extracto de jamaica, inmediatamente después del secado por aspersión y tras 6 meses de almacenamiento.

Table 3. Antioxidant activity of the different treatments with pomegranate juice and hibiscus extract immediately after spray drying and after 6 months of storage.

Tratamientos (JG:EJ)	ABTS		DPPH	
	mg ETrolox/100 g de muestra en peso seco	Inhibición %	mg EA.A/100 g de muestra en peso seco	Inhibición %
C1, 100:0	2 563.47 ± 113.04 ^e	60.45 ± 1.85 ^c	534.31 ± 64.96 ^d	19.92 ± 0.94 ^d
M1, 70:30	2 772.17 ± 34.70 ^d	63.86 ± 0.57 ^c	820.49 ± 175.61 ^c	24.07 ± 2.55 ^c
M2, 50:50	3 905.50 ± 36.20 ^c	82.40 ± 0.59 ^b	826.99 ± 14.90 ^c	24.17 ± 0.22 ^c
M3, 30:70	4 070.72 ± 42.89 ^b	85.11 ± 0.70 ^b	1402.60 ± 141.49 ^b	32.53 ± 2.05 ^b
C2, 0:100	4 717.10 ± 65.27 ^a	95.68 ± 1.07 ^a	4 729.43 ± 43.99 ^a	80.83 ± 0.64 ^a
Después 6 meses de almacenamiento				
C1, 100:0	714.96 ± 89.92 ^d	31.90 ± 2.79 ^d	120.18 ± 21.27 ^c	8.32 ± 0.54 ^c
M1, 70:30	861.90 ± 12.47 ^c	36.46 ± 0.39 ^c	309.65 ± 42.54 ^b	13.13 ± 1.08 ^b
M2, 50:50	936.73 ± 54.94 ^c	38.78 ± 1.71 ^c	436.46 ± 10.96 ^a	16.24 ± 0.28 ^a
M3, 30:70	1 114.96 ± 51.03 ^b	44.32 ± 1.58 ^b	416.67 ± 35.04 ^a	15.84 ± 0.89 ^a
C2, 0:100	1 287.75 ± 22.73 ^a	49.68 ± 0.71 ^a	439.47 ± 34.51 ^a	16.42 ± 0.88 ^a

JG: jugo de granada, EJ: extracto de jamaica. Promedio de tres repeticiones ± desviación estándar C1 y C2: controles. M1, M2 y M3: mezclas. ^{a, b, c}Valores con letras minúsculas diferentes en la misma columna expresan diferencia estadísticamente significativa (P < 0.05), prueba de Tukey.

punícico y ácido elágico, los cuales, debido a su notable capacidad antioxidante, han demostrado beneficios para la salud humana en ensayos *in vitro* e *in vivo* (Haidari y col., 2009; Khajebishak y col., 2019; Mortada y col., 2020). Por otro lado, investigaciones sobre la jamaica han demostrado sus efectos beneficiosos para la salud, principalmente atribuidos a su alta actividad antioxidante, gracias a la presencia de compuestos bioactivos como ácidos fenólicos y antocianinas. Estos compuestos juegan un papel fundamental en la neutralización de especies reactivas de oxígeno, proporcionando un efecto protector frente al daño celular (Borrás-Linares y col., 2015; Maciel y col., 2018; Vargas-León y col., 2018; Archaina y col., 2019).

Los tratamientos conteniendo jugo de granada y extracto de jamaica microencapsulados mostraron capacidad antioxidante, que permanecen durante el proceso de secado por aspersión, especialmente cuando se aumenta la proporción de extracto de jamaica, lo que permite considerar a estos ingredientes naturales como fuentes funcionales de com-

puestos bioactivos para aplicaciones en la industria alimentaria y de suplementos (Archaina y col., 2019).

Estabilidad los microencapsulados después de 6 meses a temperatura ambiente

El almacenamiento por 6 meses a temperatura ambiente (± 25 °C), de los polvos microencapsulados, indujo una reducción significativa en la concentración de antioxidantes y en la capacidad de inhibición de los radicales ABTS y DPPH en todas las formulaciones (Tabla 3). El tratamiento control C1 mostró actividad antioxidante de 31.90 % y 8.32 %, respectivamente, valores menores a los presentados por el tratamiento C2 con valores de 49.68 % y 16.42 %. Ambos tratamientos mantuvieron una actividad antioxidante relativa, con inhibiciones del 36.46 % al 44.32 % para ABTS y del 13.13 % al 16.24 % para DPPH.

La disminución de la actividad antioxidante podría estar relacionada con la degradación de compuestos bioactivos, como polifenoles, taninos y alcaloides, debido a factores como

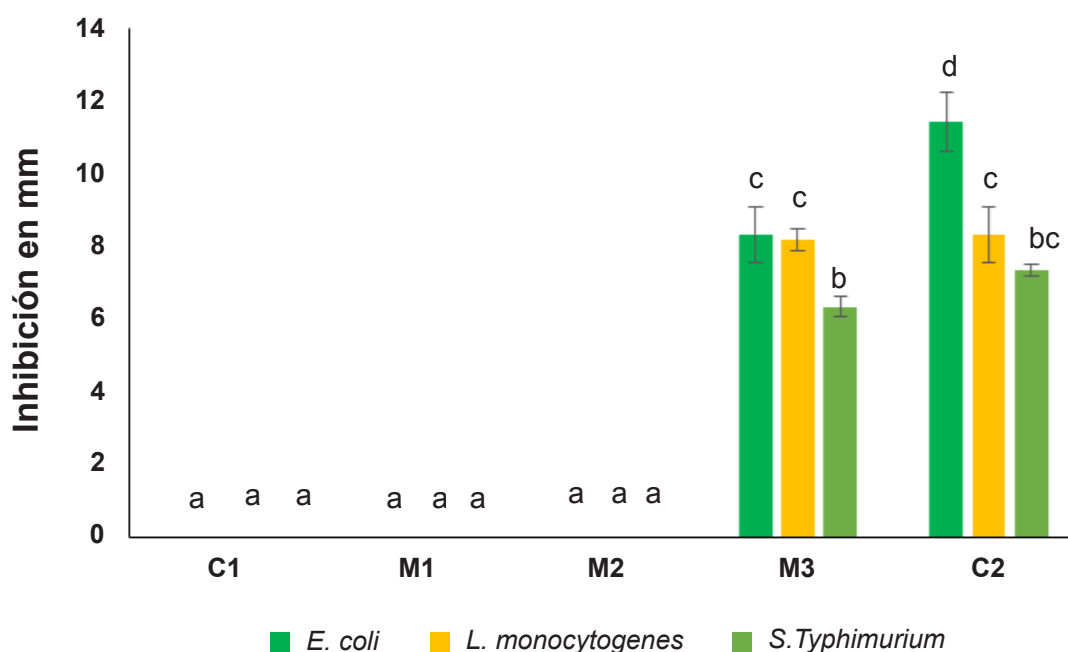
la exposición al oxígeno, la humedad y la luz, como lo sugieren estudios previos (Ochoa-Reyes y col., 2022). Sin embargo, que los tratamientos mantuvieran actividad antioxidante tras seis meses, sugiere que estos microencapsulados podrían ser una opción viable para aplicaciones en la industria alimentaria, donde se requiere una funcionalidad prolongada en productos procesados (Ozkan y col., 2019).

Capacidad antimicrobiana

El tratamiento C1, compuesto de solo jugo de granada, no presentó actividad antimicrobiana contra *E. coli*, *L. monocytogenes* y *Salmonella Typhimurium* (Figura 2), ya que en el análisis microbiológico no indujo la formación de halo de inhibición y tampoco lo hicieron los tratamientos M1 y M2, que lo contenían hasta en un 50 %. En contraste, el tra-

tamiento C2 (solo extracto de jamaica) mostró una inhibición significativa del crecimiento bacteriano, con particular eficacia para *E. coli*, con halo de inhibición de 11.43 ± 0.81 mm. El tratamiento M3 conteniendo (70 % de extracto de jamaica fue el único que mostró una inhibición significativa del crecimiento bacteriano.

Estos resultados indicaron que solo el extracto de jamaica tuvo efecto inhibidor del crecimiento de microorganismos a las condiciones estudiadas, probablemente debido a su alta concentración de antocianinas y polifenoles, compuestos bioactivos conocidos por su capacidad de alterar la membrana celular de las bacterias y suprimir su crecimiento, lo que demuestra su efectividad como agente antimicrobiano (Portillo-Torres y col., 2019; Izquierdo-Vega y col., 2020). Rangel-Vargas y col. (2017)



■ Figura 2. Efecto antimicrobiano de los tratamientos microencapsulados de jugo de granada y extracto de jamaica contra *E. coli*, *S. Typhimurium* y *L. monocytogenes* en diferentes proporciones: C1 (100:0), M2 (70:30), M3 (50:50), M4 (30:70) y C2 (0:100), correspondientes a las proporciones de jugo de granada y extracto de jamaica, respectivamente.

Figure 2. Antimicrobial effect of the microencapsulated treatments of pomegranate juice and hibiscus extract against *E. coli*, *S. Typhimurium*, and *L. monocytogenes* in different proportions: C1 (100:0), M2 (70:30), M3 (50:50), M4 (30:70), and C2 (0:100), corresponding to the proportions of pomegranate juice and hibiscus extract, respectively.

encontraron que extractos acuosos de jamaica fueron efectivos en la reducción de poblaciones de *L. monocytogenes*, *S. Typhimurium* y *E. coli* en alimentos. La mayor eficacia observada en C2, y su pérdida a partir de su adición en proporción 50:50, sugiere una relación dosis-dependiente entre la concentración de extracto de jamaica y la actividad antimicrobiana.

Los tratamientos C2 y M3 perdieron parcialmente su capacidad antimicrobiana contra los patógenos evaluados después de 6 meses de almacenamiento. Este fenómeno puede atribuirse a la degradación de antocianinas y polifenoles, compuestos bioactivos presentes en el extracto de jamaica responsables de la actividad antimicrobiana (Portillo-Torres y col., 2019).

La temperatura de almacenamiento influye en la estabilidad de las antocianinas. A mayor temperatura, se incrementa la tasa de degradación de estos compuestos. Un estudio indicó que las antocianinas presentes en extractos de gulupa (*Passiflora edulis*, Sims) mostraron la mayor tasa de degradación a temperatura ambiente (21 °C), seguida por refrigeración (5 °C) y congelación (-14 °C), donde fueron más estables (Meneses-Marentes y col., 2019).

CONCLUSIONES

El proceso de secado por aspersión confirmó adecuadas propiedades fisicoquímicas de los microencapsulados de jugo de granada y extracto de jamaica, y permitió preservar su

capacidad antioxidante. Los tratamientos C2 (extracto de jamaica) y M3 (30:70, jugo de granada y extracto de jamaica) fueron las muestras más prometedoras al presentar y preservar mejor sus propiedades fisicoquímicas y antioxidantes, tonalidades más rojizas y también fueron las únicas con capacidad antimicrobiana contra los tres patógenos evaluados. Los resultados obtenidos sugirieron que el uso de extracto de jamaica puede incrementar las propiedades del jugo de granada, fruta con buena aceptación en el mercado. La formulación 30:70 (jugo de granada: extracto de jamaica) podría ser una alternativa ideal para el desarrollo de productos funcionales, aprovechando las propiedades de ambos ingredientes.

AGRADECIMIENTOS

Al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento del proyecto con clave 20677.24-PD denominado Evaluación de las propiedades antioxidantes y antimicrobianas de microencapsulados de jugo de granada adicionado con jamaica, en la convocatoria de Proyectos de Investigación Científica, Desarrollo Tecnológico e Innovación 2024, de los Institutos Tecnológicos Descentralizados. Además, a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por todas las facilidades de infraestructura usadas en el desarrollo experimental del proyecto.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declararon no tener conflictos de intereses de ningún tipo.

REFERENCIAS

AACC, (2000). Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists, (11 th Ed.), Vol II, American Association of Cereal Chemists, St. Paul. [En línea]. Disponible en: <https://www.cereals-grains.org/resources/Methods/Pages/default.aspx>. Fecha de consulta: 6 de enero de 2025.

Álvarez-Cervantes, P., Cancino-Díaz, J. C., Fabela-Illescas, H. E., Cariño-Cortés, R., López-Villagas, E. O., Ariza-Ortega, J. A., Belefant-Miller, H., &

Betanzos-Cabrera, G. (2021). Spray-drying microencapsulation of pomegranate juice increases its antioxidant activity after *in vitro* digestion. *International Journal of Food Science and Technology*, 56(10), 5089-5096. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15093>

Archaina, D., Vasile, F., Guzmán, J. J., Alamilla, L., & Carolina, B. (2019). Physical and functional properties of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) extract spray dried with maltodextrin-gum arabic

mixtures. *May*, 1-9. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14065>

Betanzos-Cabrera, G., Montes-Rubio, P. Y., Fabela-Illescas, H. E., Belefant-Miller, H., Cancino-Diaz, J. C., Montes-Rubio, P. Y., & Fabela-Illescas, H. E. (2015). Antibacterial activity of fresh pomegranate juice against clinical strains of *Staphylococcus epidermidis*. *Food & Nutrition Research*, 59(1), 276-280. <https://doi.org/10.3402/fnr.v59.27620>

Borrás-Linares, I., Fernández-Arroyo, S., Arráez-Roman, D., Palmeros-Suárez, P. A., Del-Val-Díaz, R., Andrade-González, I., Fernández-Gutiérrez, A., Gómez-Leyva, J. F., & Segura-Carretero, A. (2015). Characterization of phenolic compounds, anthocyanidin, antioxidant and antimicrobial activity of 25 varieties of Mexican Roselle (*Hibiscus sabdariffa*). *Industrial Crops and Products*, 69, 385-394. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.02.053> <https://doi.org/10.32870/rmip.vi.552>

Choudhury, N., Meghwal, M., & Das, K. (2021). Microencapsulation: An overview on concepts, methods, properties and applications in foods. *Food Frontiers*, 2(4), 426-442. <https://doi.org/10.1002/fft2.94>

Daza, L. D., Fujita, A., Fávaro-Trindade, C. S., Rodrigues-Ract, J. N., Granato, D., & Genovese, M. I. (2016). Effect of spray drying conditions on the physical properties of Cagaita (*Eugenia dysenterica* DC.) fruit extracts. *Food and Bioprocess Technology*, 97, 20-29. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2015.10.001>

Dhakal, S. P. & He, J. (2020). Microencapsulation of vitamins in food applications to prevent losses in processing and storage: A review. *Food Research International*, 137, 109326. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109326>

Díaz-López, A. C., Villa-Cruz, V. y Vela-Gutiérrez, G. (2023). Viabilidad de bacterias ácido lácticas microencapsuladas mediante secado por aspersión con almidón de malanga en dos suplementos alimenticios. *CienciaUAT*, 18(2), 145-154. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v18i2.1804>

Haidari, M., Ali, M., Ward Casscells, S., & Madjid, M. (2009). Pomegranate (*Punica granatum*) purified polyphenol extract inhibits influenza virus and has a synergistic effect with oseltamivir. *Phytomedicine*, 16(12), 1127-1136. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2009.06.002>

Hernández-López, Z., Rangel-Vargas, E., Castro-Rosas, J., Gómez-Aldapa, C. A., Cadena-Ramírez,

A., Acevedo-Sandoval, O. A., Gordillo-Martínez, A. J., & Falfán-Cortés, R. N. (2018). Optimization of a spray-drying process for the production of maximally viable microencapsulated *Lactobacillus pentosus* using a mixture of starch-pulque as wall material. *Lwt*, 95, 216-222. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.04.075>

Izquierdo-Vega, J. A., Arteaga-Badillo, D. A., Sánchez-Gutiérrez, M., Morales-González, J. A., Vargas-Mendoza, N., Gómez-Aldapa, C. A., Castro-Rosas, J., Delgado-Olivares, L., Madrigal-Bujaidar, E., & Madrigal-Santillán, E. (2020). Organic acids from Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.)-A brief review of its pharmacological effects. *Biomedicine*, 8(5), 1-16. <https://doi.org/10.3390/BIOMEDICINES8050100>

Jafari, S. M., Ghalegi-Ghalenoei, M., & Dehnad, D. (2017). Influence of spray drying on water solubility index, apparent density, and anthocyanin content of pomegranate juice powder. *Powder Technology*, 311, 59-65. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.01.070>

Jiménez-González, O. & Guerrero-Beltrán, J. Á. (2021). Extraction, microencapsulation, color properties, and experimental design of natural pigments obtained by spray drying. *In Food Engineering Reviews*, 13(4), 769-811. <https://doi.org/10.1007/s12393-021-09288-7>

Khajebishak, Y., Payahoo, L., Alivand, M., Hamishehkar, H., Mobasser, M., Ebrahimzadeh, V., Alipour, M., & Alipour, B. (2019). Effect of pomegranate seed oil supplementation on the GLUT-4 gene expression and glycemic control in obese people with type 2 diabetes: A randomized controlled clinical trial. *Journal of Cellular Physiology*, 234(11), 19621-19628. <https://doi.org/10.1002/jcp.28561>

Maciel, L. G., do-Carmo, M. A. V., Azevedo, L., Dagher, H., Molognoni, L., de-Almeida, M. M., Granato, D., & Rosso, N. D. (2018). *Hibiscus sabdariffa* anthocyanins-rich extract: Chemical stability, in vitro antioxidant and antiproliferative activities. *Food and Chemical Toxicology*, 113, 187-197. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2018.01.053>

Marques, L. G., Ferreira, M. C., & Freire, J. T. (2007). Freeze-drying of acerola (*Malpighia glabra* L.). *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 46(5), 451-457. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2006.04.011>

Martínez-Ramírez, E. Z., González-Cruz, L.,

- Bernardino-Nicanor, A., Silva-Martínez, G. A., Falfan-Cortes, R. N., Gonzalez-Montiel, S., & Gomez-Aldapa, C. A. (2024). Hibiscus Acid Inhibitory Capacity of Angiotensin Converting Enzyme: an In Vitro and In Silico Study. *Plant Foods for Human Nutrition*, 79(1), 234-241. <https://doi.org/10.1007/s11130-024-01142-5>
- Meneses-Marentes, N. A., Herrera-Ramírez, E. J., & Tarazona-Díaz, M. P. (2019). Characterization and stability of an extract rich in anthocyanins from passion purple fruit peel. *Revista Colombiana de Química*, 48(2), 27-32. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v48n2.76682>
- Mortada, W. I., Awadalla, A., Khater, S. M., Barakat, N. M., Husseiny, S. M., & Shokeir, A. A. (2020). Preventive effect of pomegranate juice against chemically induced bladder cancer: An experimental study. *Heliyon*, 6(10), e05192. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05192>
- Nguyen, Q. D., Dang, T. T., Nguyen, T. V. L., Nguyen, T. T. D., & Nguyen, N. N. (2022). Microencapsulation of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) anthocyanins: Effects of different carriers on selected physicochemical properties and antioxidant activities of spray-dried and freeze-dried powder. *International Journal of Food Properties*, 25(1), 359-374. <https://doi.org/10.1080/10942912.2022.2044846>
- Ochoa-Reyes, E., Guevara-Aguilar, A. y Tirado-Gallegos, J. M. (2022). Adición de extracto de cáscara de granada en un alimento tradicional mexicano y evaluación de la estabilidad al procesado. *Universitas Agri*, 1 (1): 18
- Ozkan, G., Franco, P., De-Marco, I., Xiao, J., & Capanoglu, E. (2019). A review of microencapsulation methods for food antioxidants: Principles, advantages, drawbacks and applications. *Food Chemistry*, 272: 494-506. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.205>
- Portillo-Torres, L. A., Bernardino-Nicanor, A., Gómez-Aldapa, C. A., González-Montiel, S., Rangel-Vargas, E., Villagómez-Ibarra, J. R., González-Cruz, L., Cortés-López, H., & Castro-Rosas, J. (2019). Hibiscus acid and chromatographic fractions from *Hibiscus sabdariffa* calyces: Antimicrobial activity against multidrug-resistant pathogenic bacteria. *Antibiotics*, 8(4), 1-18. <https://doi.org/10.3390/antibiotics8040218>
- Rangel-Vargas, E., Gómez-Aldapa, C. A., Falfan-Cortes, R. N., Rodríguez-Marín, M. L., Godínez-Oviedo, A., Acevedo-Sandoval, O. A., & Castro-Rosas, J. (2017). Attachment of 13 types of foodborne bacteria to Jalapeño and Serrano peppers and antibacterial effect of roselle calyx extracts, sodium hypochlorite, colloidal silver, and acetic acid against these foodborne bacteria on peppers. *Journal of Food Protection*, 80(3), 406-413. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-16-269>
- Reyes, V., Chotiko, A., Chouljenko, A., & Sathivel, S. (2018). Viability of *Lactobacillus acidophilus* NRRL B-4495 encapsulated with high maize starch, maltodextrin, and gum arabic. *Lwt*, 96, 642-647. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.06.017>
- Rezende, Y. R. R. S., Nogueira, J. P., & Narain, N. (2018). Microencapsulation of extracts of bioactive compounds obtained from acerola (*Malpighia emarginata* DC) pulp and residue by spray and freeze drying: Chemical, morphological and chemometric characterization. *Food Chemistry*, 254, 281-291. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.02.026>
- Ribeiro, A. M., Shahgol, M., Estevinho, B. N., & Rocha, F. (2020). Microencapsulation of Vitamin A by spray-drying, using binary and ternary blends of gum arabic, starch and maltodextrin. *Food Hydrocolloids*, 108, 106029. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106029>
- Rodríguez, O., Cardoso, F., González, J., Íñiguez, C. y Núñez, M. (2017). Temperaturas de secado para la microencapsulación de saborizantes frutales mediante secado por aspersión. *Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 27(3), 1-6.
- Tatasciore, S., Santarelli, V., Neri, L., Di-Mattia, C. D., Di-Michele, A., Mastrocola, D., & Pittia, P. (2024). Microencapsulation of hop bioactive compounds by spray drying: Role of inlet temperature and wall material. *Current Research in Food Science*, 8. 100769 <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2024.100769>
- Tonon, R. V., Brabet, C., & Hubinger, M. D. (2008). Influence of process conditions on the physicochemical properties of açai (*Euterpe oleracea* Mart.) powder produced by spray drying. *Journal of Food Engineering*, 88(3), 411-418. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.02.029>
- Tonon, R. V., Brabet, C., & Hubinger, M. D. (2010). Anthocyanin stability and antioxidant activity of spray-dried açai (*Euterpe oleracea* Mart.) juice produced with different carrier agents. *Food*

Research International, 43(3), 907–914. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.12.013>

Türkyılmaz, M., Hamzaoglu, F., Çiftci, R. B. A., & Özkan, M. (2023). Increase in colour stability of pomegranate juice against 5-hydroxymethylfurfural (HMF) through copigmentation with phenolic acids. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(15), 7836–7848. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12866>

Vargas-León, E. A., Díaz-Batalla, L., González-Cruz, L., Bernardino-Nicanor, A., Castro-Rosas, J., Reynoso-Camacho, R., & Gómez-Aldapa, C. A. (2018). Effects of acid hydrolysis on the free radical scavenging capacity and inhibitory activity of the angiotensin converting enzyme of phenolic compounds of two varieties of Jamaica (*Hibiscus sabdariffa*). *Industrial Crops and Products*, 116, 201–208. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.02.044>

Ye, Q., Georges, N., & Selomulya, C. (2018). Microencapsulation of active ingredients in functional foods: From research stage to commercial food products. *Trends in Food Science and Technology*, 78, 167–179. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.05.025>



Imagen de Canva educativo

Optimización del proceso de hidrólisis del colágeno bovino y evaluación de sus propiedades tecnofuncionales y antioxidantes

Optimization of the bovine collagen hydrolysis process and evaluation of its techno-functional and antioxidant properties

Raúl Reyes-Bautista^{1*}, Erik Gustavo Tovar-Pérez², Gustavo Hernández-Mendoza¹, Luis Alberto Reyes-Nava³, Jorge Enrique Pliego-Sandoval³

RESUMEN

El colágeno es una proteína abundante en los organismos vertebrados. Forma parte de tejidos conectivos como la piel, las articulaciones, los ligamentos y los huesos. Se puede hidrolizar enzimáticamente con la finalidad de mejorar sus propiedades tecnofuncionales (solubilidad, emulsificación, espumantes, entre otras). Durante la generación de colágeno hidrolizado se exponen secuencias peptídicas que presenten propiedades bioactivas, como antioxidantes, antihipertensivas y antidiabéticas. El objetivo de este trabajo fue optimizar el grado de hidrólisis del colágeno bovino mediante proteasas comerciales y la evaluación de las propiedades tecnofuncionales y antioxidantes, de los productos resultantes. La optimización del grado de hidrólisis se realizó usando la metodología de superficie de respuesta, mediante un diseño central compuesto. El análisis proximal de la materia prima mostró un alto contenido de proteína (88 %). El proceso de optimización indicó un grado de hidrólisis extensivo (76.38 %, $P \leq 0.05$) para la enzima PAL[®], con una relación E/S de 1.43 UN/g en un tiempo de 23.75 h. Las propiedades tecnofuncionales se asociaron de manera positiva ($P \leq 0.05$) con el grado de hidrólisis: 95.02 % con la solubilidad (pH 9), 48 % y 34 % con la capacidad y la estabilidad de emulsificación, respectivamente. El espumado disminuyó en función del incremento del grado de hidrólisis con la enzima HT proteolitic[®], alcanzando una reducción del 47 % de la estabilidad y 26 % en la capacidad. La capacidad antioxidante del colágeno hidrolizado (24 h) incrementó de manera significativa ($P \leq 0.05$), mostrando un valor de 62.38 % (DPPH) y 0.39 UA_{700 nm} (poder reductor) con la enzima PAL[®] y de 80.55 % (ABTS) para la enzima HT proteolitic[®]. La optimización de la hidrólisis enzimática del colágeno mejoró sus propiedades tecnofuncionales (solubilidad y emulsificación) y antioxidantes.

PALABRAS CLAVE: colágeno hidrolizado, grado de hidrólisis, propiedades tecnofuncionales, optimización, actividad antioxidante.

ABSTRACT

Collagen is a protein abundant in vertebrate organisms. It is part of connective tissues such as skin, joints, ligaments, and bones. To enhance its techno-functional characteristics, namely solubility, viscosity, emulsification, and foaming capacity, it can undergo chemical and enzymatic hydrolysis. This process unveils specific peptide sequences with demonstrable bioactive functions, including antioxidant, antihypertensive, and antidiabetic effects. The present paper had a twofold purpose. Firstly, it aimed at optimizing the enzymatic hydrolysis of bovine collagen using commercial proteases. Secondly, it intended to assess the resulting products in terms of their techno-functional and antioxidant properties. Hydrolysis optimization was conducted using response surface methodology (RSM) with a Central Composite Design. Proximate analysis of the raw material indicated a high protein content (88 %). The optimization process indicated an extensive hydrolysis level (76.38 %, $P \leq 0.05$) for the PAL[®] enzyme, with an E/S ratio of 1.43 UN/g within a 23.75 h period. The techno-functional properties were positively correlated ($P \leq 0.05$) with the hydrolysis degree: 95.02% with solubility (pH 9), and 48% and 34% with capacity and emulsification stability respectively. Conversely, foaming capacity of emulsification declined with increased hydrolysis when the HT proteolytic[®] enzyme was applied, resulting in a 47 % reduction in foam stability and a 26 % decrease in foam volume. The antioxidant capacity of hydrolyzed collagen (24 h) increased significantly ($P \leq 0.05$), showing a 62.38 % value (DPPH) and 0.39 UA_{700 nm} (reduction power) employing the PAL[®] enzyme and an 80.55 % value (ABTS) employing the HT proteolytic[®] enzyme. Overall, the optimization of enzymatic collagen hydrolysis enhanced both the techno-functional (solubility and emulsification) and antioxidant properties of the final hydrolysates.

KEYWORDS: hydrolyzed collagen, degree of hydrolysis, techno-functional properties, process optimization, antioxidant activity.

*Correspondencia: raul.rb@purisima.tecnm.mx/Fecha de recepción: 4 de marzo de 2025/Fecha de aceptación: 9 de septiembre de 2025/ Fecha de publicación: 15 de septiembre de 2025.

¹Tecnológico Nacional de México/ITS de Purísima del Rincón, Laboratorio de Bioprocesos, División de Ingeniería Bioquímica, boulevard del Valle núm. 2301, Guardarrayas, Purísima del Rincón, Guanajuato, México, C. P. 36425. ²Universidad Autónoma de Querétaro, campus Amealco, Facultad de Ingeniería, Amealco de Bonfil, Querétaro, México, C. P. 76850. ³Universidad de Guadalajara, Centro Universitario del Sur, Departamento de Ciencias de la Naturaleza, Ciudad Guzmán, Jalisco, México, C. P. 49000.

INTRODUCCIÓN

El colágeno es una de las proteínas más ubicuas y abundantes. Está presente en los tejidos conectivos laxo y denso, piel, tendones, huesos, cartilago, córneas, dentina y vasos sanguíneos. Su nombre proviene del griego “*kólla*” (pegamento) y “*gen*” (producción), aludiendo a su función estructural en los tejidos (Silvipriya y col., 2015).

Entre las diversas fuentes de colágeno comercial se encuentran los animales terrestres, las aves de corral y las especies marinas (Zhang y col., 2016a; Tawalbeh y col., 2025). La piel y los huesos de origen porcino y bovino se utilizan ampliamente para obtener colágeno con esos fines (Deng y col., 2023). Actualmente, diferentes industrias utilizan diversos residuos de producción, como las pieles de pescado y pollo, para su obtención, así como del procesamiento de grenetinas, basadas en procesos de economía circular, con enfoques integrados y holísticos para la utilización de los residuos alimentarios (Zhang y col., 2022).

El mercado del colágeno ha mejorado constantemente y el índice de productos que lo contienen ha aumentado debido a sus excepcionales propiedades tecnofuncionales y bioactivas que tienen aplicaciones en las industrias alimentaria y farmacéutica (Barzideh y col., 2014). Sus propiedades se pueden clasificar en dos categorías: las relacionadas con su comportamiento gelificante, como la capacidad de retención de agua, la formación de gel, el espesamiento y la texturización; y las asociadas con el comportamiento superficial, como la formación de películas, la función coloide protectora, la adhesión y cohesión, la estabilización, la formación de espuma y la emulsión (Ahmad y col., 2024).

Debido a su funcionalidad y creciente demanda, se han realizado diversos estudios para mejorar la calidad y las aplicaciones mediante su transformación en hidrolizados o péptidos bioactivos (León-López y col., 2019; Aguirre-Cruz y col., 2020). Se ha demostrado que los péptidos contenidos en el colágeno

hidrolizado pueden favorecer la salud humana, exhibiendo actividades con efectos antihiper-tensivos, antiinflamatorios, antioxidantes, anticancerígenos, antiobesogénicos, antimicrobianos y antidiabéticos (Anzani y col., 2020).

El colágeno hidrolizado se puede obtener mediante el uso de enzimas comerciales. En ese proceso se rompen los enlaces peptídicos de la proteína, formándose moléculas más pequeñas, tales como, péptidos y aminoácidos libres (Ulug y col., 2021).

Los péptidos antioxidantes son moléculas naturales utilizadas en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética, por su capacidad para prevenir o retrasar la oxidación, lo que los convierte en un ingrediente popular en diversos productos (Aguirre-Cruz y col., 2020). Se ha evidenciado la actividad antioxidante de los hidrolizados/péptidos de colágeno obtenidos de piel de bovino, cerdo, pescado, pollo, así como de subproductos (huesos, pellejos, cartílagos) de las mismas fuentes. Dicha actividad puede evaluarse *in vitro* mediante métodos de generación de radicales libres (DPPH y ABTS) y reacciones redox (poder reductor) (Hong y col., 2019; León-López y col., 2019).

El colágeno hidrolizado tiene un alto potencial en la industria alimentaria, ya que puede contribuir a propiedades tecnofuncionales como la formación de espuma, la solubilidad y la emulsión. Estas propiedades pueden verse afectadas por distintos parámetros de hidrólisis, como el tipo de enzimas utilizadas, el tiempo de hidrólisis, la relación enzima-sustrato, la temperatura, la relación disolvente/material (tejido conteniendo colágeno) y el pH (Tawalbeh y col., 2023).

La optimización de la hidrólisis del colágeno ha sido estudiada mediante la metodología de superficie de respuesta (MSR) (Hema y col., 2017; Yu y col., 2018; Blanco y col., 2019; Nguyen y col., 2021). Esta herramienta estadística y matemática se utiliza ampliamente en el diseño de experimentos por su facilidad

para optimizar las condiciones en que una o varias variables pueden mejorar un proceso (Myers y col., 2016; Montgomery, 2020).

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la optimización del grado de hidrólisis del colágeno bovino mediante dos proteasas comerciales y determinar las propiedades tecnofuncionales y antioxidantes de los productos resultantes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materia prima

Se trabajó con barredura (colágeno parcialmente desnaturalizado, obtenido de pieles bovinas) provenientes de la industria productora de grenetina, proporcionada por la empresa Nova Orgánica S. A. de C. V., y generadas por la empresa Progel S. A. de C. V. Las muestras fueron deshidratadas a 60 °C durante 3 h en un horno de secado (Thermo Scientific Hera-therm, Waltham, EUA) y posteriormente se molieron en molino de cuchillas (IKA® A-10 Basic, Staufen, Alemania). La harina obtenida se hizo pasar por un tamiz de 250 µm y fue almacenada en refrigeración a 4 °C durante 6 meses, y procesada para su análisis, en un periodo no mayor a 6 meses hasta su uso.

Análisis químico proximal

El análisis químico proximal de la harina de barredura se realizó de acuerdo con los métodos de la Asociación de Químicos Analíticos Oficiales (AOAC, por sus siglas en inglés: Association of Official Analytical Chemists) (AOAC, 2000). Determinación de humedad por método de secado en horno (método No. 14004); cenizas por incineración (método No. 14006); extracto etéreo (grasas) por el método de Soxhlet (No. 7.056); determinación de proteínas por el método Kjeldahl (No. 2.049) utilizando un factor de conversión de 5.55 (Solski y Imafidon, 1990).

Hidrólisis del colágeno

Las muestras de harina de colágeno se hidrolizaron comparando la acción de dos proteasas comerciales PAL® y HT proteolitic® (Enmex, Grupo Kerry) ambas de grado alimenticio.

La enzima PAL®, se produce mediante fermentación controlada usando *Bacillus licheniformis*. Tiene actividad reportada > 2 600 UN/g (Unidad de Northrop; se define como la cantidad de enzima que hidroliza el 40 % del sustrato de caseína en las condiciones del ensayo) (Lambré y col., 2023) y sus condiciones óptimas de operación se obtienen a 60 °C y pH 8.5. La enzima HT proteolitic® se obtiene por fermentación controlada de *Bacillus subtilis*. Su actividad > 180 UN/g, y sus condiciones óptimas de operación son 50 °C y pH 7.2.

El proceso de hidrólisis, para cada enzima, se llevó a cabo utilizando un diseño factorial mixto, con dos factores: tiempo (0 h, 4 h, 8 h, 12 h, 16 h, 20 h y 24 h) y relación enzima-sustrato [E/S] (0.4 UN/g, 0.8 UN/g y 1.2 UN/g). El proceso de hidrólisis se realizó por triplicado en matraces Erlenmeyer, con una relación [E/S]: búfer 1:10 (m/v) y agitación constante (120 rpm). El pH se ajustó con búfer de fosfatos 0.1 M y, junto con la temperatura, se mantuvieron en el nivel óptimo para cada enzima evaluada. La reacción enzimática fue detenida añadiendo fluoruro de fenilmetilsulfonilo (PMSF 2 mg/mL) en una relación 1:10 (v/v). Las muestras fueron congeladas a -20 °C hasta su análisis. La eficacia del proceso hidrolítico se evaluó determinando la cantidad de enlaces peptídicos escindidos mediante la medición del grado de hidrólisis.

Grado de hidrólisis (GH)

Se determinó evaluando la cantidad de grupos amino libres, por el método de ácido trinitrobenzensulfónico (TNBS) (Adler-Nissen, 1979), con algunas modificaciones. Se añadieron alícuotas de 125 µL de las muestras hidrolizadas a tubos de ensayo que contenían 1 mL de búfer de fosfatos 0.5 M, pH 8.2. Posteriormente, se agregó 1 mL de solución de TNBS (1 mg/mL en agua destilada); la mezcla se incubó a 50 °C durante 1 h en oscuridad utilizando un termo baño (Felisa®, Zapopan, México). La reacción se detuvo añadiendo 2 mL de HCl 0.1 N. Las muestras se enfriaron a temperatura ambiente durante 30 min y se midió la absorbancia a 340 nm utilizando un lector de

microplacas (Thermo scientific Multiskan SKY, Waltham, EUA). El GH se calculó mediante la ecuación (1):

$$GH (\%) = \left[\frac{NH_{2t} - NH_{2o}}{NH_{2max} - NH_{2o}} \right] \times 100 \quad (1)$$

Donde:

NH_{2t} = concentración de grupos amino libres después de la hidrólisis.

NH_{2o} = concentración de grupos amino libres del colágeno sin hidrolizar.

NH_{2max} = concentración de grupos amino libres después de hidrólisis total del colágeno (que se realizó por hidrólisis con HCl 6 N a 120 °C durante 24 h).

La concentración de grupos amino libres se expresó en meq L-Leucina/g proteína, los cuales fueron determinados mediante la elaboración de una curva patrón de L-Leucina (0 mM-2.5 mM).

Optimización del GH

Las condiciones utilizadas como base para el estudio de optimización fueron a las 24 h con una relación E/S de 1.2 UN/g, debido a que obtuvieron el mayor GH. Para evaluar los efectos de los parámetros de procesamiento, incluido el tiempo y la relación enzima-sustrato, se utilizó la MSR, empleando un diseño central compuesto (DCC) de 2 factores y 5 niveles (Tabla 1).

La variable dependiente (Y) fue el grado de hidrólisis. El DCC incluyó 24 experimentos, que consistieron en 9 puntos factoriales, 6 puntos axiales y 9 puntos centrales (Zhang y

col., 2016b). Los datos experimentales de los ensayos se ajustaron a un polinomio empírico de segundo orden, de acuerdo con la ecuación (2):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2 \quad (2)$$

Donde:

β_0 = Coeficiente constante de intersección.

β_1 y β_2 = Coeficientes de primer orden.

β_{11} y β_{22} = Coeficientes de segundo orden.

β_{12} = Coeficiente de la interacción.

La ecuación del modelo propuesto predice la respuesta en función de los diferentes niveles de las variables independientes (X_1 : tiempo y X_2 : relación E/S). La significancia de cada coeficiente en el modelo resultante se determinó utilizando la prueba F y el valor P alcanzado. La adecuación del modelo polinomial se expresó mediante el coeficiente de determinación múltiple (R_{adj}^2) y se empleó el análisis de varianza (ANOVA, por sus siglas en inglés: Analysis of Variance) para determinar la significancia del modelo. Además, la ecuación polinomial ajustada se presentó como un gráfico de superficie para visualizar la relación entre la respuesta y los niveles experimentales de cada factor, los cuales se mostraron mediante el diagrama de Pareto de efectos estandarizados. El análisis estadístico se realizó utilizando el software Minitab 18 (State College, PA 16801, USA).

Determinación de proteína soluble

Se cuantificaron las fracciones proteínicas mediante el método de Bradford (1976), con

■ Tabla 1. Valores codificados y no codificados de variables independientes del DCC.

Table 1. Coded and uncoded values of CCD independent variables.

Variables	Símbolo	Niveles codificados				
		Axial	Bajo	Central	Alto	Axial
		$-\alpha^*$	-1	0	1	α
		Niveles no codificados				
Tiempo (h)	X_i	18.34	20	24	28	29.66
E/S (UN/g)	X_o	0.63	0.8	1.2	1.6	1.77

* α son los puntos axiales. $\alpha = \sqrt[4]{2^k}$, donde $k = 2$ (factores), $\alpha = \sqrt[4]{2^2} = \sqrt{2} = 1.41$

algunas modificaciones. Brevemente, el reactivo de Bradford se obtuvo al: 0.01 % (m/v) Azul Brillante de Coomassie G-250, 4.7 % (m/v) etanol y 8.5 % (m/v) de ácido fosfórico. Se mezclaron 100 µL de la disolución de proteína con 5 mL del reactivo de Bradford. La absorbancia se midió a 595 nm después de 2 min en un lector de microplacas (Thermo scientific Multiskan SKY, Waltham, EUA). Se elaboró una curva patrón de albúmina sérica bovina (BSA, por sus siglas en inglés: bovine serum albumin) 0.1 mg/mL a 1 mg/mL, para cuantificar la concentración de proteína en las muestras de colágeno hidrolizado.

Propiedades tecnofuncionales

Las propiedades de solubilidad, espumado y emulsificación, se evaluaron de acuerdo con los métodos reportados por Hu y col. (2023) con algunas modificaciones.

Solubilidad

La solubilidad de las fracciones proteínicas (sin hidrolizar) y de los hidrolizados de colágeno se determinaron preparando dispersiones al 1 % m/v en búfer de fosfatos 0.05 M (ajustando el pH de 3 a 9 con HCl o NaOH 0.1 M). Las dispersiones se mantuvieron en agitación en una placa (IKA® C-MAG, Staufen, Alemania) durante 30 min y se centrifugaron a 10 000 xg por 30 min a temperatura ambiente. Los sobrenadantes se filtraron a través de filtros de 0.45 µm (Millipore, Mississauga, Canadá) y se determinó la proteína solubilizada por el método de Bradford. El porcentaje de solubilidad se calculó mediante ecuación (3).

$$\text{Solubilidad (\%)} = \left(\frac{A}{B}\right) \times 100 \quad (3)$$

Donde:

A = cantidad de proteína en el sobrenadante.

B = cantidad de proteína en la dispersión inicial.

Espumado

La capacidad de espumado (CEs) y la estabilidad de espumado (EEs) se determinaron preparando dispersiones al 1 % m/v en búfer de fosfatos 0.05 M. Las dispersiones de proteína e hidrolizados se homogenizaron por separa-

do a 13 500 rpm durante 1 min, utilizando un homogeneizador (Ultra Turrax IKA T25, IKA-Labortechnik, Staufen, Alemania). La CEs y EEs de espumado se calcularon mediante las ecuaciones (4 y 5):

$$CEs (\%) = \left(\frac{A - B}{B}\right) \times 100 \quad (4)$$

Donde:

A = volumen de la espuma inmediatamente después de homogenizar.

B = volumen inicial de la fase líquida.

$$EEs (\%) = \left(\frac{C - B}{B}\right) \times 100 \quad (5)$$

Donde:

C = volumen de la espuma después de 30 min.

B = volumen inicial de la fase líquida.

Emulsificación

Se evaluó la capacidad de emulsificación (CEm) y la estabilidad de emulsificación (EEm), de la fracción proteínica e hidrolizados. Para la formación de la emulsión, se mezclaron 5 mL de la dispersión de la muestra (1 % m/v en búfer de fosfatos 0.05 M) con 5 mL de aceite de maíz y se homogenizaron a 20 000 rpm durante 1 min, utilizando un homogeneizador Ultra Turrax (IKA T25, IKA-Labortechnik, Staufen, Alemania). Una vez formada la emulsión, ésta se sometió a centrifugación a 3 000 xg durante 5 min. La CEm se determinó mediante la ecuación (6):

$$CEm (\%) = \left(\frac{A}{B}\right) \times 100 \quad (6)$$

Donde:

A = altura de la capa emulsificada después de centrifugar.

B = altura del contenido antes de la emulsión.

La EEm se midió en presencia de calor, manteniendo la emulsión formada en baño maría usando un termo baño (Felisa®, Zapopan, México) a 80 °C durante 30 min. Pasado este tiempo se enfrió a chorro de agua (25 °C). Posteriormente la emulsión se centrifugó a 3 000 xg

por 5 min. Para la evaluación de la estabilidad se midió la altura de la emulsión antes del tratamiento térmico y la altura remanente de la emulsión después de la centrifugación. Para la medición de la altura, se utilizó un vernier digital (Marca INSIZE IP67, Suzhou, China). Para el cálculo de la EEm se utilizó la ecuación (7).

$$EE_m (\%) = \left(\frac{C}{A} \right) \times 100 \quad (7)$$

Donde:

C = altura de la capa remanente de la emulsión.

A = altura de la capa emulsificada después de centrifugar.

Propiedades biofuncionales: actividad antioxidante

Capacidad de atrapamiento del radical DPPH (CAR-DPPH)

Se determinó como lo describen Liang y col. (2014) con algunas modificaciones. Brevemente, se añadieron 2 mL de muestra de proteína/hidrolizado de colágeno a 2 mL de solución etanólica de DPPH 0.2 mM. La mezcla de reacción se agitó y se mantuvo 30 min a temperatura ambiente en oscuridad. La absorbancia se midió a 517 nm utilizando un lector de microplacas (Thermo scientific multiskan sky, Waltham, EUA.). Se utilizó etanol en lugar de la muestra como control. La CAR-DPPH se calculó utilizando la ecuación (8):

$$CAR - DPPH (\%) = \left(1 - \frac{Abs_2}{Abs_1} \right) \times 100 \quad (8)$$

Donde:

Abs₂ = absorbancia de la muestra.

Abs₁ = absorbancia del control.

Capacidad de atrapamiento del radical ABTS (CAR-ABTS)

Se determinó como lo describen Xie y col. (2021) con algunas modificaciones. El radical catiónico ABTS se generó mezclando una solución madre de ABTS (7 mM) con persulfato de sodio (2.45 mM); la mezcla se dejó reposar en oscuridad durante 12 h a temperatura ambiente. Luego, la solución de radicales ABTS se diluyó en solución de búfer de fosfatos salino

0.01 M, pH 7.4 (PBS, por sus siglas en inglés: phosphate buffered saline) hasta una absorbancia de 0.70 ± 0.02 nm a 730 nm antes de su uso. El experimento se realizó mezclando 2 mL de la proteína/hidrolizado de colágeno con 2 mL de la solución diluida de ABTS. La absorbancia se leyó a 730 nm (entre 1 min a 6 min después de la mezcla inicial) utilizando un lector de microplacas (Thermo scientific multiskan sky, Waltham, EUA.). Se usó PBS en lugar de la muestra como control. La CAR-ABTS se calculó utilizando la ecuación (9).

$$CAR - ABTS (\%) = \left(1 - \frac{Abs_2}{Abs_1} \right) \times 100 \quad (9)$$

Donde:

Abs₂ = absorbancia de la muestra.

Abs₁ = absorbancia del control.

Poder reductor

Se midió según el método descrito por Xie y col. (2021) con algunas modificaciones. Se mezclaron 2.5 mL de la muestra de proteína/hidrolizado de colágeno con 2.5 mL de búfer de fosfatos (0.2 M, pH 7.4) y 2.5 mL de ferricianuro de potasio (1 % m/v). Esta mezcla se incubó a 50 °C durante 20 min, y se añadieron 2.5 mL de ácido tricloroacético (10 % m/v) a la mezcla de reacción, seguida de una centrifugación a 4 000 rpm durante 10 min. Posteriormente, se mezclaron 2.5 mL del sobrenadante con 0.5 mL de agua desionizada y 0.5 mL de cloruro férrico (FeCl₃) (0.1 % m/v). La reacción se continuó durante 15 min a temperatura ambiente, posteriormente se midió la absorbancia a 700 nm (UA700 nm), utilizando un lector de microplacas (Thermo scientific multiskan sky, Waltham, EUA.). Una absorbancia más alta indicaba una mayor capacidad reductora (Fe³⁺ → Fe²⁺).

Análisis estadístico

Los resultados se presentaron como la media de tres muestras independientes y su desviación estándar. Se aplicó el ANOVA de una vía para evaluar los efectos de los tratamientos. Se realizó la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov para cumplir con los supuestos del ANOVA que son normalidad, además de

verificar la varianza constante (igualdad de la varianza de los tratamientos) e independencia entre las muestras (Montgomery, 2020). Para evaluar las diferencias entre los valores medios, se realizó la prueba *Post-hoc* de Tukey con un nivel de significancia de $P \leq 0.05$. El análisis estadístico de los datos se realizó con el software Minitab 18 (State College, PA 16801, USA).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis químico proximal

La composición proximal de la materia prima utilizada se muestra en la Tabla 2. El contenido en proteína cruda fue de 88.01 % y su composición general fue parecida a la de polvo y fibras de colágeno obtenidas de pieles de bovino (Wolf y col., 2009). Estos tres productos fueron diferentes a la gelatina de bovino, con un contenido de 52.22 % de proteína (Wulandari y col., 2016).

Las barreduras son consideradas, dentro de la industria de producción de grenetinas, como la materia prima que no cumple con las especificaciones para ser comercializada, sin embargo, están conformadas por colágeno parcialmente desnaturalizado con alto contenido proteínico (Tabla 2). Este subproducto, por lo tanto, se puede hidrolizar de forma exhaustiva para obtener un producto que puede ser comercializado como colágeno hidrolizado.

Grado de hidrólisis (GH)

El tiempo de hidrólisis y la relación E/S pre-

sentaron una correlación positiva, sobre el GH (Figura 1). Para la enzima PAL[®], hasta las 20 h de hidrólisis, no se encontraron diferencias significativas ($P > 0.05$). Los valores de 64.53 % y 70.38 % en el GH, para las relaciones E/S de 0.8 UN/g y 1.2 UN/g, fueron cercanos (Figura 1A). Un comportamiento similar presentó la enzima HT proteolitic[®] ($P \leq 0.05$) a lo largo de las distintas cinéticas (0.4 E/S, 0.8 E/S y 1.2 E/S). Sin embargo, no se presentaron diferencias significativas ($P > 0.05$) a partir de las 24 h en los sistemas con una relación E/S de 0.8 UN/g y 1.2 UN/g, obteniéndose valores de GH de 60.31 % y 67.72 %, respectivamente.

En el presente estudio se encontró un GH extensivo de 70 % (PAL[®], E/S 1.2 UN/g, 24 h) y 68 % (HT proteolitic[®], E/S 1.2 UN/g, 24 h) (Figura 1). Las endoproteasas (enzimas que pueden actuar sobre enlaces peptídicos dentro de la molécula de proteína) se utilizan normalmente para producir hidrolizados de proteínas, a veces en combinación con exoproteasas (enzimas que pueden escindir enlaces peptídicos en un extremo C o N terminales), además se ha reportado que las preparaciones enzimáticas comerciales pueden contener principalmente una proteasa o una mezcla de proteasas (Philipps-Wiemann, 2018; Vogelsang-O'dwyer y col., 2022).

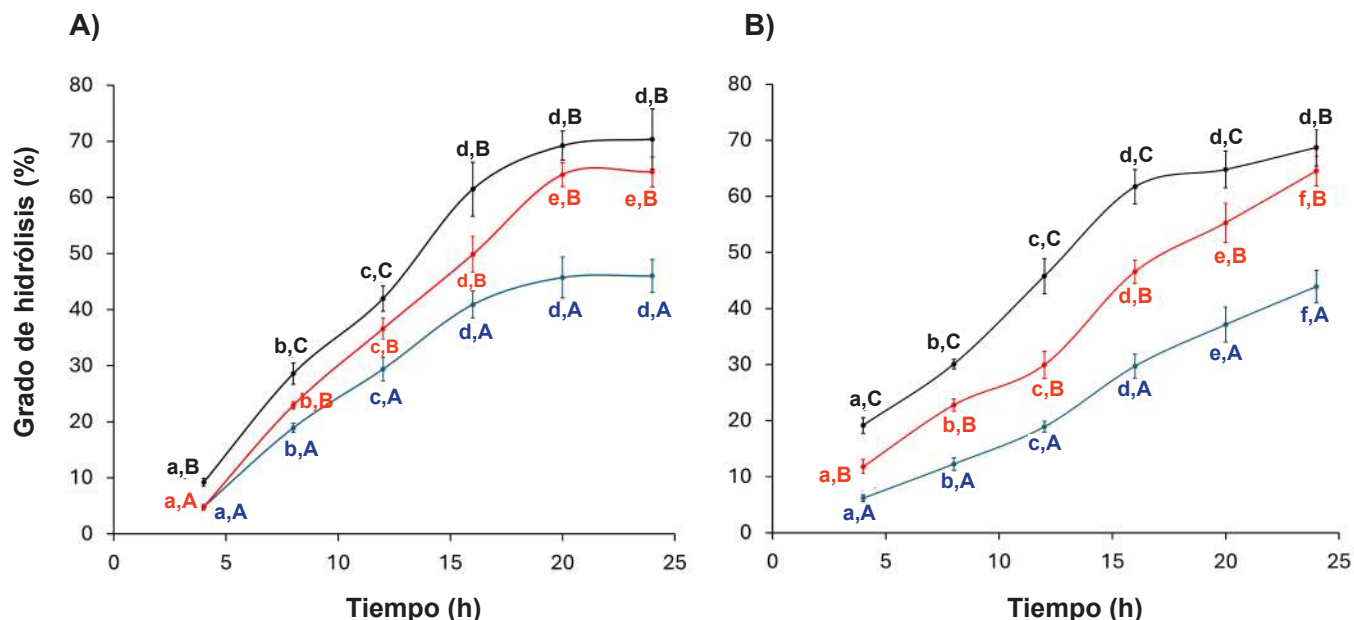
Zhang y col. (2013) realizaron la hidrólisis enzimática de colágeno bovino por 4 h con alcalasa[®] obteniendo un GH de 18.1 %. Por otro lado, Nuñez y col. (2020) hicieron el mismo proceso, con gelatina de piel bovina durante

■ Tabla 2. Análisis químico proximal de la barredura y comparación con otras fuentes.

Table 2. Proximal chemical analysis of the sweeping and comparison with other sources.

Parámetro	Contenido (g/100g de materia total)			
	Barredura ^a	Polvo de Colágeno ^b	Fibras de Colágeno ^b	Gelatina de Bovino-A.ac. 0.1 M ^c
Proteína	88.01 ± 3.11	85.8 ± 0.6	85.6 ± 0.6	52.22
Grasa	0.62 ± 0.07	1.6 ± 0.1	0.8 ± 0.1	0.26
Cenizas	0.89 ± 0.09	2.3 ± 0.0	1.0 ± 0.0	0.84
Humedad	10.27 ± 0.29	10.7 ± 0.3	9.3 ± 0.1	6.48

^aMuestra de colágeno utilizada en este estudio. ^bWolf y col. (2009) utili y ^cWulandari y col. (2016).



■ Figura 1. Cinética del grado de hidrólisis de las enzimas: A) PAL® y B) HT proteolitic®. Línea azul, roja y negra indican las relaciones E/S de 0.4 UN/g, 0.8 UN/g y 1.2 UN/g, respectivamente. Letras minúsculas y mayúsculas distintas indican diferencias significativas ($P \leq 0.05$), a través del tiempo (a, b y c) y para la relación E/S (A, B y C).

Figure 1. Kinetics of the degree of hydrolysis of the enzymes: A) PAL® and B) HT proteolitic®. Blue, red and black lines indicate the E/S ratios of 0.4 UN/g, 0.8 UN/g and 1.2 UN/g, respectively. Distinct lower- and upper-case letters indicate significant differences ($P \leq 0.05$), over time (a, b and c) and for the E/S ratio (A, B and C).

24 h, utilizando la enzima subtilisina, una endoproteinasa de *Bacillus licheniformis*, generando un GH de 26.28 %. Algunos autores, hidrolizando el colágeno de piel de pescado con diversas enzimas, reportaron diferentes grados de hidrólisis en un tiempo de 3 h de digestión: protamex® 12.29 %, alcalasa® 17.40 %, tripsina 15.02 % y neutrasa® 13.81 % (Zhang y col., 2016b; Sun y col., 2022). Los valores de GH inferiores a los mostrados en el presente trabajo, pueden deberse a distintos factores, entre los cuales se encuentran, el tipo de proteasa utilizada, la relación E/S, el tiempo de hidrólisis, el tipo de escisión enzimática (endo o exopeptidasa), así como la temperatura y el pH de operación (Bhuimbar y col., 2024).

Optimización del GH

Los valores experimentales y los predichos del GH, por el modelo ajustado de segundo orden, se muestran en la Tabla 3, en la evaluación de la MSR, mediante el DCC, para las

proteasas PAL® y HT proteolitic®. El valor experimental más alto de GH para la enzima PAL® se obtuvo con el orden de corrida 7 (74.42 %); en tanto que, para HT proteolitic® fue con la corrida 4 (71.08 %).

Las Figuras 2 y 3 muestran los gráficos de superficie de respuesta (A), el diagrama de Pareto (B) y el modelo matemático con el valor del coeficiente de determinación (C), para la actividad hidrolítica de las enzimas PAL® y HT proteolitic®, respectivamente. Las curvas de superficie de respuesta (Figuras 2A y 3A), obtenidas mediante la aplicación del DCC, mostraron la presencia de un valor máximo (Myers y col., 2016; Montgomery, 2020), para el GH.

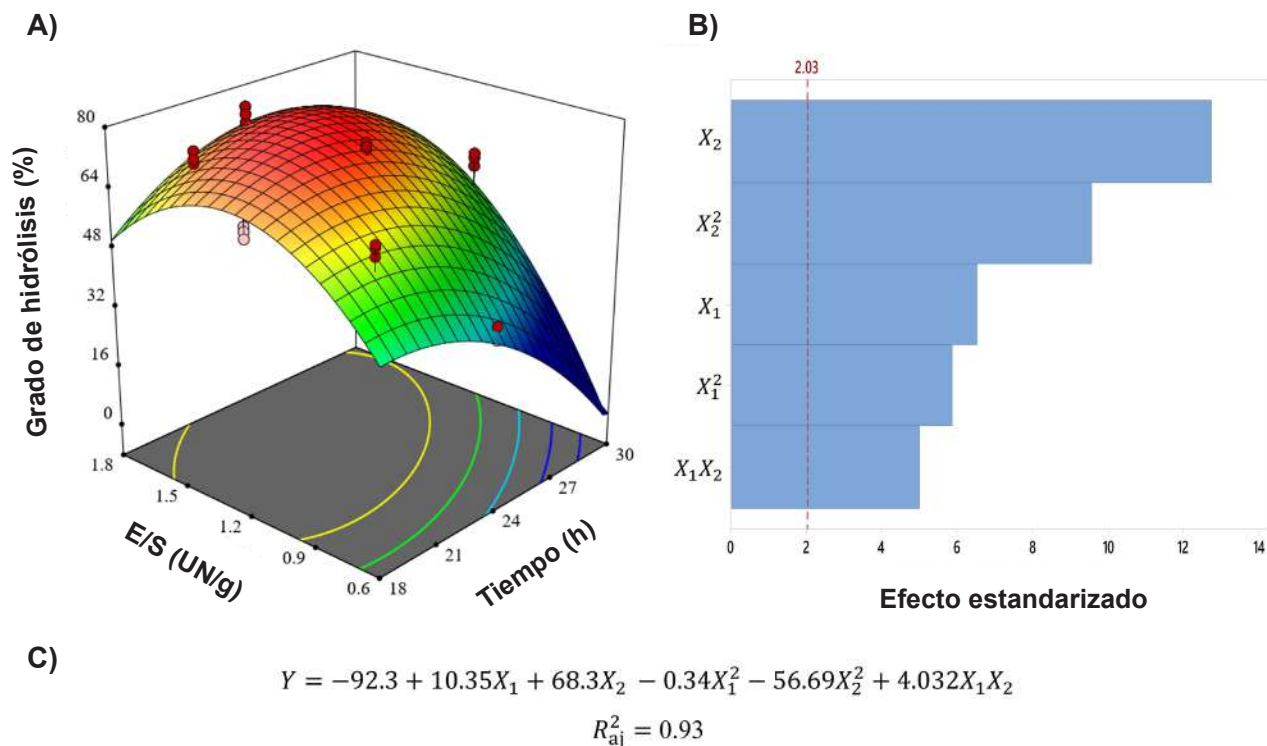
Las Figuras 2A y 3B muestran los diagramas de Pareto para los efectos estandarizados. Todos los términos de los coeficientes del modelo de segundo orden fueron significativos

■ Tabla 3. Valores experimentales y predichos del GH en la evaluación de la MRS mediante el DCC para las proteasas PAL® y HT proteolitic®.

Table 3. Experimental and predicted DH values in the MRS evaluation by CCD for the PAL® and HT proteolitic® proteases.

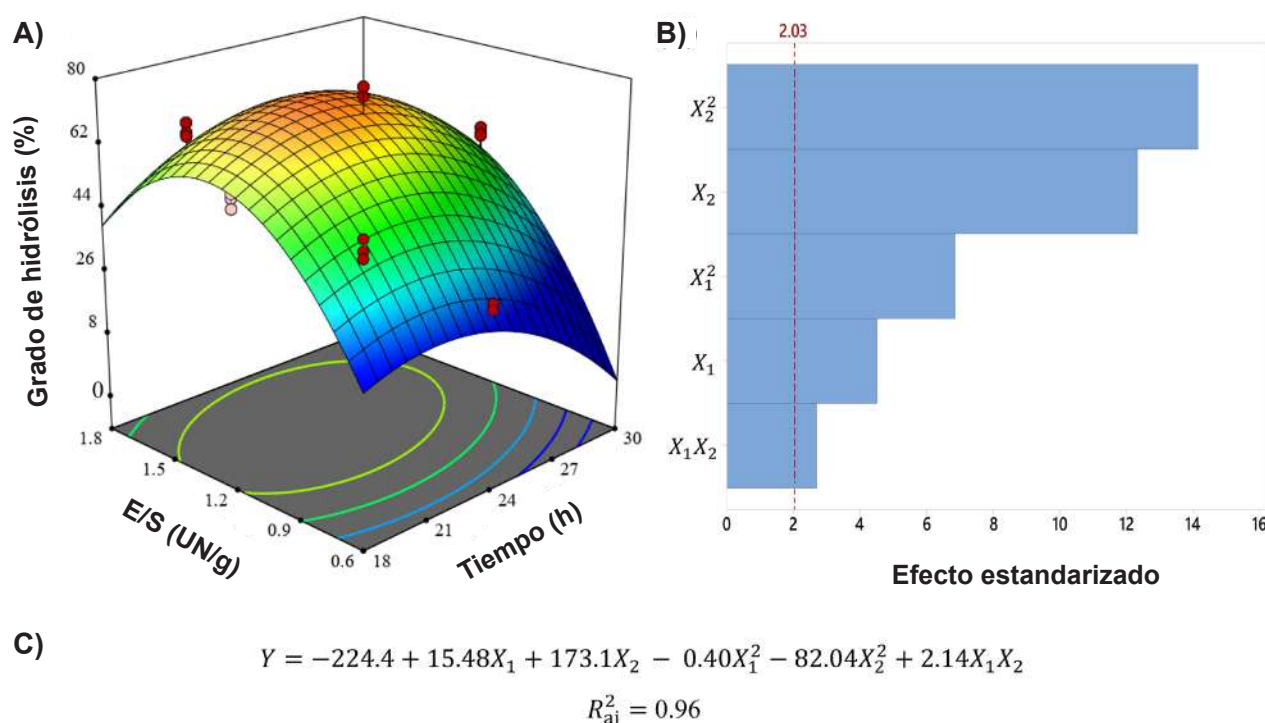
Orden de corrida	Bloque	Niveles codificados		Niveles no codificados		PAL®		HT proteolitic®	
		Tiempo (h)	E/S (UN/g)	Tiempo (h)	E/S (UN/g)	Y* (%) ¹	Y* (%) ²	Y* (%) ¹	Y* (%) ²
1	1	-1	1	20	1.6	71.75 ± 1.69	69.15	63.95 ± 1.92	61.76
2	1	1	-1	28	0.8	29.88 ± 1.99	34.01	29.81 ± 2.43	31.71
3	1	-1	-1	20	0.8	63.88 ± 1.56	58.84	47.50 ± 2.62	46.61
4	1	0	0	24	1.2	73.41 ± 0.56	72.66	71.08 ± 2.15	69.63
5	1	1	1	28	1.6	65.55 ± 1.21	70.12	57.94 ± 2.61	60.55
6	2	1.41	0	29.66	1.2	58.03 ± 1.73	53.10	53.77 ± 1.22	51.24
7	2	0	0	24	1.2	74.42 ± 3.99	72.66	67.53 ± 1.06	69.63
8	2	0	1.41	24	1.77	73.09 ± 2.19	70.93	57.72 ± 2.40	58.93
9	2	-1.41	0	18.34	1.2	63.83 ± 1.60	69.98	59.59 ± 2.04	62.63
10	2	0	-1.41	24	0.63	36.73 ± 1.85	38.11	28.53 ± 1.50	27.83

*Y: es el grado de hidrólisis (GH), ¹Valor experimental de la variable, ²Valor predicho por el modelo.



■ Figura 2. Optimización de la hidrólisis del colágeno utilizando la enzima PAL®. A) Superficie de respuesta ajustada por el modelo que indica el efecto del tiempo (X_1) y la relación E/S (X_2) sobre el grado de hidrólisis (Y). B) Diagrama de Pareto y C) Ecuación polinomial y coeficiente de determinación múltiple que se ajustó al modelo de superficie de respuesta.

Figure 2. Optimization of collagen hydrolysis using the PAL® enzyme. A) Response surface fitted by the model indicating the effect of time (X_1) and E/S ratio (X_2) on the degree of hydrolysis (Y). B) Pareto chart and C) Polynomial equation and coefficient of multiple determination fitted to the response surface model.



■ Figura 3. Optimización de la hidrólisis del colágeno utilizando la enzima HT proteolitic®. A) Superficie de respuesta ajustada por el modelo que indica el efecto del tiempo (X_1) y la relación E/S (X_2) sobre el grado de hidrólisis (Y). B) Diagrama de Pareto y C) Ecuación polinomial y coeficiente de determinación múltiple que se ajustó al modelo de superficie de respuesta.

Figure 3. Optimization of collagen hydrolysis using the HT proteolitic® enzyme. A) Response surface fitted by the model indicating the effect of time (X_1) and E/S ratio (X_2) on the degree of hydrolysis (Y). B) Pareto chart and C) Polynomial equation and coefficient of multiple determination fitted to the response surface model.

($P \leq 0.05$), para los factores Tiempo (X_1) y la relación E/S (X_2). En la enzima PAL®, el efecto lineal, correspondiente a la relación E/S (X_2), fue el de mayor peso dentro de la variabilidad que explica el modelo cuadrático (Figura 2B); encontrándose, así mismo, un coeficiente de determinación ajustado para el modelo presentado de 0.93 (Figura 2C).

En la enzima HT proteolitic®, el efecto cuadrático de la relación E/S (x_2^2) fue el término, dentro del modelo, que mayor peso tuvo sobre la respuesta (Figura 3B). Además, la variabilidad de los datos, explicada por el modelo matemático, arrojó un valor de 0.96 (Figura 3C).

La MSR mostró que los valores máximos de optimización del GH extensivo, para las enzimas PAL® y HT proteolitic® (Figuras 2A y 3A), fueron

76.38 % (23.75 h y 1.43 E/S) y 72.15 % (23.18 h y 1.35 E/S), respectivamente. Estas condiciones se utilizaron para determinar las propiedades tecnofuncionales y biofuncionales.

En la literatura no se encontró información sobre el proceso de optimización de la hidrólisis de colágeno bovino utilizando la MSR, pero existen reportes de estudios que emplearon sustratos de colágeno de piel de pescado, pepino de mar y atún de aleta amarilla, entre otras. Yu y Chen (2014) documentaron la optimización del GH de colágeno del pepino de mar (*Acaudina molpadioides*) mediante la MSR, utilizando una hidrólisis con papaína durante 30 min, y hallaron un GH de 17 %. Por otro lado, durante la hidrólisis para la producción de péptidos de colágeno, a partir de la piel de pescado (*Epinephelus malabaricus*), usando las

enzimas proteolíticas pepsina (5.47 h), papaína (4.25 h) y las proteasas del páncreas de bovino (4.25 h), encontraron un GH de 10 %, 20 % y 28 %, respectivamente (Hema y col., 2017). Por último, Nguyen y col. (2021) optimizaron la hidrólisis de colágeno de la piel de atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*) con la enzima alcalasa® en un tiempo de 5.2 h con un GH de 24.54 %.

Propiedades tecnofuncionales

La hidrólisis enzimática, aplicada a las fibras de colágeno, ha sido ampliamente utilizada con la finalidad de evidenciar algunas propiedades tecnofuncionales (solubilidad, espumado y emulsificación).

Solubilidad

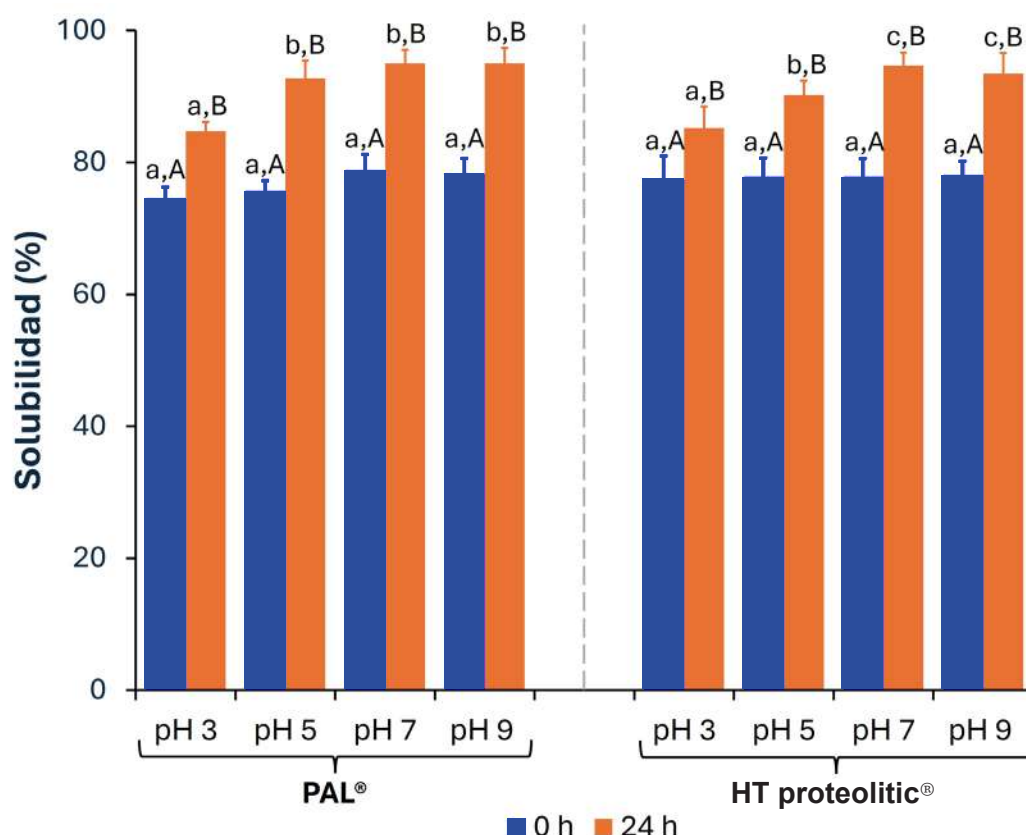
La solubilidad es una de las propiedades más importantes de las proteínas, ya que define sus aplicaciones en la industria alimentaria, farmacéutica y médica, entre otras. Influye en otras propiedades, como la formación de espuma y la emulsión, debido a la rápida migración y adsorción de los péptidos en la superficie de la interfase (Tawalbeh y col., 2025).

En la Figura 4 se observa el efecto del pH sobre el colágeno nativo (0 h) y el colágeno obtenido por hidrólisis enzimática (24 h), a diferente pH (3 a 9). Ambas enzimas, PAL® y HT proteolitic®, indujeron un incremento significativo ($P \leq 0.05$) en la solubilidad del rango de pH estudiado. La hidrólisis con PAL® no incrementó significativamente ($P \leq 0.05$) a partir de pH 5, en tanto que con HT proteolitic® no incrementó a partir de pH 7. En un ambiente alcalino, con un pH entre 7 a 11, el colágeno adquiere una mayor carga negativa, mejorando las fuerzas de repulsión entre las cadenas, aumentando la solubilidad (Song y col., 2021b). El máximo valor de GH alcanzado fue de 95.02 ± 2.3 % (pH 9) y 93.47 ± 3.1 % (pH 7) para PAL® y HT proteolitic®, respectivamente.

El comportamiento encontrado en el presente estudio es similar al reportado por algunos autores. Chi y col. (2016) documentaron valo-

res de solubilidad superiores al 95 % para hidrolizados de colágeno de diferentes pieles de pescado. En su estudio reportaron que el proceso de hidrólisis, usando tripsina en un medio débilmente básico, podría mejorar considerablemente la solubilidad de las muestras en todos los valores de pH. Anzani y col. (2020) evaluaron la solubilidad de los hidrolizados de colágeno de pieles bovinas y porcinas obtenidos mediante la enzima Alcalasa® y encontraron que el efecto de la hidrólisis enzimática mejoraba la solubilidad ≈ 100 %. Los productos de hidrólisis enzimática, con un GH elevado, presentaron péptidos con pesos moleculares bajos. González-Serrano y col. (2022) documentaron el peso molecular relativo de hidrolizados de piel de colágeno del pescado carpa, obtenidos con Alcalasa®, en donde las fracciones con pesos entre 3 kDa a 10 kDa y < 1 kDa, reportaron solubilidades de 87.3 % y 89.1 %, respectivamente, lo que indica que la solubilidad aumentó al disminuir el tamaño, probablemente debido al hecho de que las moléculas pequeñas fueron más polares y solubles.

El efecto de la hidrólisis enzimática, en la solubilidad de una proteína específica, puede cambiar por efecto de varios factores, que incluyen el tipo de proteasa, el tiempo de reacción, el grado de hidrólisis, la relación enzima-sustrato y las condiciones ambientales (Vogelsang-O'dwyer y col., 2022). Los valores obtenidos en el presente estudio indicaron que el hidrolizado de colágeno mostraba una mayor solubilidad, asociada a un alto grado de hidrólisis (Figuras 2 y 3). Este aumento en la solubilidad podría deberse a la reducción del peso molecular por la acción de las enzimas, induciendo el aumento en el número de unidades polipeptídicas más pequeñas, y probablemente más hidrofílicas y solvatadas. Los péptidos más pequeños pueden ser más polares y formar enlaces de hidrógeno con el agua, lo que incrementa su solubilidad en soluciones acuosas (Chi y col., 2016). Por lo tanto, se puede especular que, una hidrólisis extensiva del colágeno, utilizando proteasas en su pH óptimo, podría ser una estrategia eficaz para mejorar la solubilidad del colágeno.



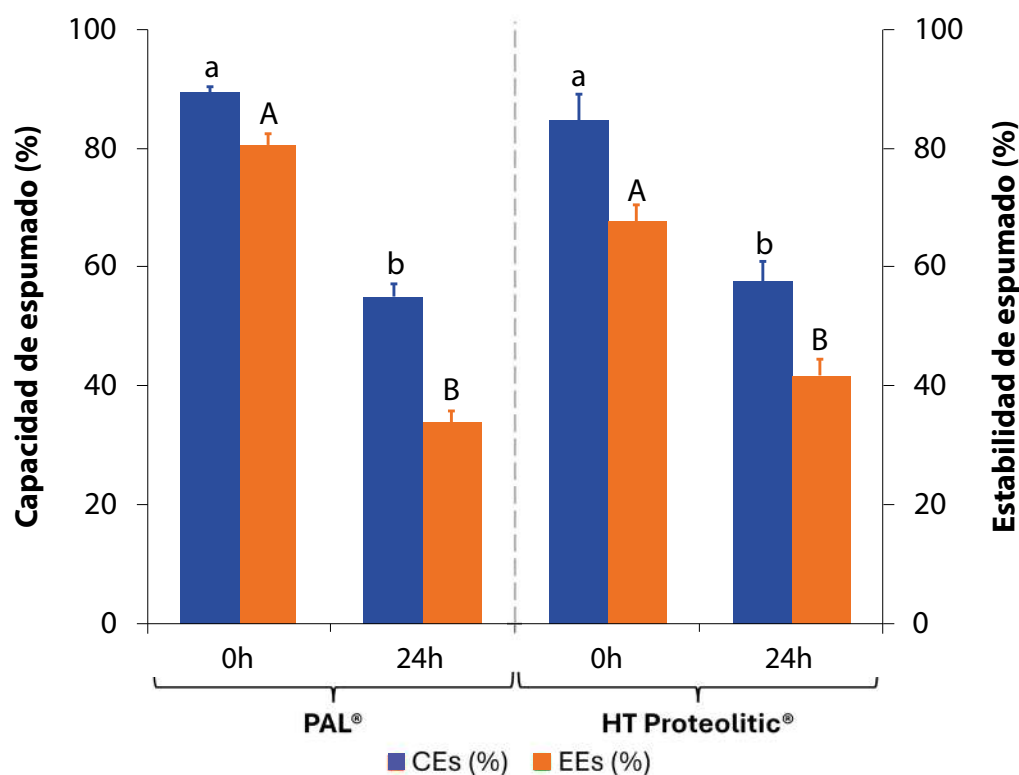
■ Figura 4. Evaluación de la solubilidad del colágeno sin hidrolizar (0 h) y el colágeno hidrolizado (24 h), para ambas enzimas utilizadas, a diferentes valores de pH. Letras minúsculas y mayúsculas distintas indican diferencias significativas ($P \leq 0.05$), por efecto del pH (a, b y c) y el tiempo (A y B).

Figure 4. Evaluation of the solubility of unhydrolyzed collagen (0 h) and hydrolyzed collagen (24 h), for both used enzymes, at different pH values. Distinct lowercase and uppercase letters indicate significant differences ($P \leq 0.05$), across pH (a, b and c) and time (A and B).

Espumado

La formación de espuma se produce cuando, en una mezcla líquida, la presencia de proteínas provoca una disminución de la tensión superficial entre la interfaz del agua y el aire. La capacidad y la estabilidad de espumado de las fracciones de péptidos son dos de los parámetros medibles para evaluar la formación y estabilidad de espumas en sistemas proteínicos y peptídicos (Vogelsang-O'dwyer y col., 2022). La Figura 5 muestra la capacidad de espumado (CEs), para los sistemas realizados con PAL® y HT proteolitic®. El efecto de la hidrólisis (24 h) causó una reducción significativa ($P \leq 0.05$) del 34 % y 27 %, respectivamente, comparado con el colágeno sin hidrolizar

(0 h). Respecto a la estabilidad de espumado (EEs) se encontró un comportamiento similar a la CEs, presentando una reducción significativa ($P \leq 0.05$) del 47 % (PAL®) y 26 % (HT proteolitic®). La CEs muestra la expansión de la espuma inmediatamente después del batido, mientras que la EEs muestra la expansión de la espuma después de batir durante un periodo de tiempo. La disminución de ambas propiedades, encontrada en este estudio, ocurrió debido a que la hidrólisis extensiva del colágeno genera fracciones peptídicas, y las moléculas de proteínas con alto peso molecular pueden interactuar mejor en la interfase generando películas más resistentes, lo que conduce a una mayor estabilidad de la es-



■ Figura 5. Evaluación de la Capacidad de Espumado (CEs) y la Estabilidad de Espumado (EEs) del colágeno sin hidrolizar (0 h) y el colágeno hidrolizado (24 h), para ambas enzimas utilizadas. Letras minúsculas y mayúsculas distintas indican diferencias significativas ($P \leq 0.05$), para CEs y EEs, respectivamente.

Figure 5. Evaluation of Foaming Capacity (FC) and Foaming Stability (FS) of unhydrolyzed collagen (0 h) and hydrolyzed collagen (24 h), for both used enzymes. Distinct lowercase and uppercase letters indicate significant differences ($P \leq 0.05$), for FC and FS, respectively.

puma. Las propiedades espumantes de la proteína pueden verse afectadas por la fuente, las propiedades intrínsecas, la composición y la conformación de las proteínas (Tawalbeh y col., 2025) y en este estudio, la hidrólisis enzimática parece haber modificado las propiedades intrínsecas.

Diversas investigaciones han evaluado la CEs y la EEs, encontrando reducciones mínimas en ambos parámetros analizados, debido a los menores tiempos de hidrólisis, lo cual genera espumas más estables, por lo que, las cadenas polipeptídicas liberadas mediante el proceso de digestión enzimática parecen haber reducido su capacidad de formar interacciones proteína-proteína, disminuyendo la incapacidad de

formar películas fuertes, debido a la falta de estabilización de la interfase líquido-aire en el sistema disperso de la espuma (Chi y col., 2016; Vidal y col., 2020; Zamorano-Apodaca y col., 2020).

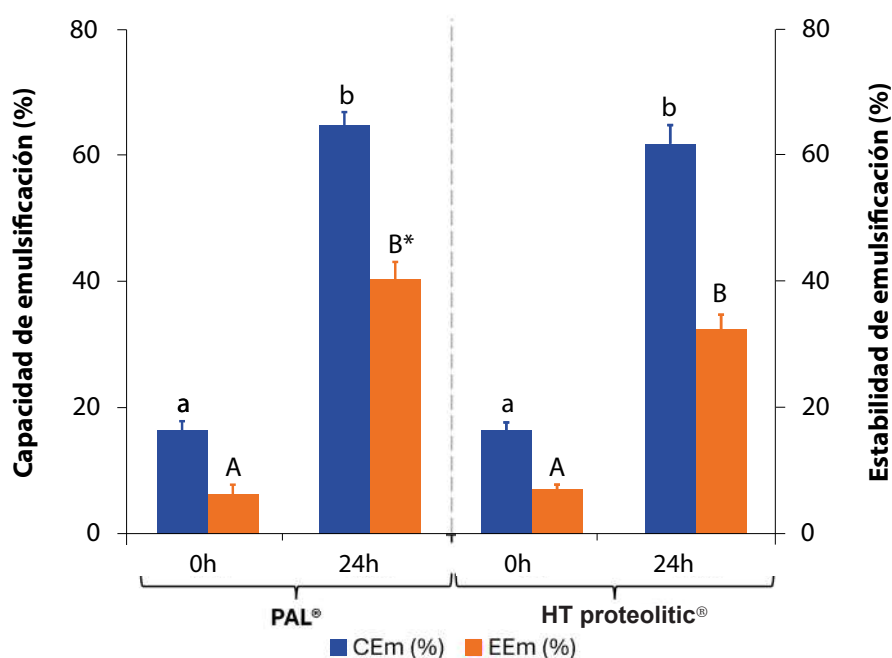
Emulsificación

Las propiedades emulsionantes son importantes en los sistemas alimentarios por que contribuyen directamente a la textura y las propiedades sensoriales de los alimentos (Xie y col., 2021). En la Figura 6 se presenta el efecto de la hidrólisis de ambas enzimas sobre la capacidad de emulsificación (CEm) y la estabilidad de la emulsión (EEem). Ambos parámetros incrementaron de manera significativa ($P \leq 0.05$), por efecto del hidrolizado

de 24 h, respecto al control, colágeno sin hidrolizar (0 h). La CEm aumentó 48 % (PAL®) y 46 % (HT proteolitic®), con respecto al colágeno sin hidrolizar. Es necesario mencionar que, la comparación a las 24 h de hidrólisis no presentó diferencias significativas ($P > 0.05$) por el tipo de enzima utilizada. Para la EEm se encontró un comportamiento similar, la estabilidad para PAL® aumentó 34 %, mientras que para HT proteolitic® incrementó en 26 %. Además, se hallaron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) para el hidrolizado de 24 h por efecto del tipo de enzima.

El comportamiento encontrado en el presente estudio fue diferente al reportado por algunos autores. Hu y col. (2023) documentaron los efectos de la CEm (53 %) y la EEm (68 %)

en colágeno extraído por pepsina, usando pH 7. Anzani y col. (2020) hidrolizaron colágeno de piel porcina, utilizando Alcala®, y reportaron una reducción en la CEm y EEm. Asociaron sus resultados a que los hidrolizados reducen el peso molecular de la fracción proteínica, y los polipéptidos más grandes, que contienen cargas y grupos hidrofílicos e hidrofóbicos, están mejor adaptados para estabilizar las películas de proteína en emulsiones de aceite en agua (Chi y col., 2014). Sin embargo, según Schmidt y col. (2020), el hidrolizado de colágeno de piel de pollo, con bajo peso molecular, presentó valores más altos de EEm y CEm en comparación con el no hidrolizado. Los autores sugieren que, en su estudio, las cadenas polipeptídicas de menor tamaño pudieron presentar mayor flexibilidad molecular, permitiéndolo-



■ Figura 6. Evaluación de la Capacidad de Emulsificación (CEm) y la Estabilidad de Emulsificación (EEm) del colágeno sin hidrolizar (0 h) y el colágeno hidrolizado (24 h), para ambas enzimas utilizadas. Letras minúsculas y mayúsculas distintas indican diferencias significativas ($P \leq 0.05$), para CEs y EEs, respectivamente, por efecto del tiempo de hidrólisis. *Indica diferencia significativa ($P \leq 0.05$) por efecto del tipo de enzima a las 24 h.

Figure 6. Evaluation of the Emulsification Capacity (EC) and Emulsification Stability (ES) of un hydrolyzed collagen (0 h) and hydrolyzed collagen (24 h), for both enzymes used. Different lowercase and uppercase letters indicate significant differences ($P \leq 0.05$), for EC and ES, respectively, due to the effect of the hydrolysis time. *Indicates significant difference ($P \leq 0.05$) due to the effect of the type of enzyme at 24 h.

les difundirse fácilmente a la interfaz aceite-agua.

Propiedades biofuncionales: actividad antioxidante

Capacidad de atrapamiento del radical DPPH (CAR-DPPH)

El radical DPPH es uno de los radicales libres más estables. Puede usarse para probar la capacidad de los compuestos para actuar como atrapadores (captadores) de radicales libres o donantes de hidrógeno (Munteanu y Apetrei, 2021). En la Tabla 4 se muestra el efecto de la hidrólisis sobre el porcentaje de atrapamiento del radical DPPH. Se puede apreciar que el colágeno hidrolizado, obtenido mediante ambas enzimas, incrementó de forma significativa ($P \leq 0.05$). Además, el valor de la CAR-DPPH a las 24 h para la enzima PAL[®] fue estadísticamente mayor, comparado con el de la enzima HT proteolitic[®]. El comportamiento descrito en el presente estudio mostró una correspondencia entre el GH y la capacidad eliminadora de radicales DPPH, lo que sugiere una probable dependencia con el tamaño molecular de los hidrolizados de colágeno. Diversas investigaciones, realizadas con hidrolizados de colágeno de piel de bovino, piel de pescado y tejido óseo bovino, presentaron el mismo comportamiento, con incrementos desde 15 % hasta 85 % en la CAR-DPPH. Esta variación depende del tiempo de hidrólisis, el tipo de proteasa, así como de la relación E/S utilizada. Los autores mencionaron que el poder antioxidante de los péptidos y/o ami-

noácidos es superior al de las proteínas nativas, debido a la facilidad de donar electrones o átomos de hidrógeno (Liang y col., 2014; Chi y col., 2016; Song y col., 2021a; Xie y col., 2021; Vidal y col., 2022).

Capacidad de atrapamiento del radical ABTS (CAR-ABTS)

El ensayo de CAR-ABTS es un método para determinar la capacidad antioxidante, en el que el radical se oxida para formar un complejo radical catiónico ABTS^{•+}. Este método también evalúa la capacidad de los antioxidantes de donar un electrón o un átomo de hidrógeno para estabilizar los radicales. Se puede aplicar en un amplio rango de pH y es soluble en medios acuosos y orgánicos (Munteanu y Apetrei, 2021). En este trabajo se observó que, en los hidrolizados de colágeno aumentó la CAR-ABTS de forma significativa ($P \leq 0.05$), sin embargo, los hidrolizados de 24 h no presentaron diferencias significativas por el efecto del sistema enzimático utilizado.

El comportamiento encontrado en este estudio es semejante al reportado por Song y col. (2021a), quienes hidrolizando colágeno de hueso bovino observaron un aumento en la CAR-ABTS. Los autores mencionaron que, el fenómeno podría resultar de la acción combinada de los aminoácidos terminales o di péptidos y tripéptidos. Además, el peso molecular más bajo puede desempeñar un papel importante, debido a que la estructura secundaria de estas moléculas expone relativamen-

■ **Tabla 4. Evaluación de la actividad antioxidante del colágeno sin hidrolizar e hidrolizado.**

Table 4. Evaluation of the antioxidant activity of unhydrolyzed and hydrolyzed collagen.

Determinación	PAL [®]		HT proteolitic [®]	
	0 h	24 h	0 h	24 h
CAR-DPPH (%)	11.11 ± 1.05 ^{a,A}	62.38 ± 2.15 ^{b,B}	9.85 ± 0.85 ^{a,A}	50.35 ± 3.04 ^{b,C}
CAR-ATBS (%)	20.90 ± 2.25 ^{a,A}	72.79 ± 5.00 ^{b,B}	21.34 ± 1.66 ^{a,A}	80.55 ± 3.72 ^{b,B}
Poder reductor (UA _{700 nm})	0.10 ± 0.01 ^{a,A}	0.39 ± 0.02 ^{b,B}	0.11 ± 0.01 ^{a,A}	0.37 ± 0.01 ^{b,B}

CAR-DPPH: Capacidad de Atrapamiento del Radical DPPH. CAR-ABTS: Capacidad de Atrapamiento del Radical ABTS. Para el colágeno sin hidrolizar (0 h) y el colágeno hidrolizado (24 h), para ambas enzimas utilizadas. Letras minúsculas distintas indican diferencia significativa ($P \leq 0.05$) para el tiempo de hidrólisis con una misma enzima; letras mayúsculas distintas indican diferencia significativa ($P \leq 0.05$) por efecto del tipo de enzima para el mismo tiempo.

te los grupos R de los aminoácidos. Por otra parte, durante la evaluación de hidrolizados de colágeno de hueso, glicosilados antes y después de llevarse a cabo la reacción de Maillard, presentaron productos de glicosilación que podrían desempeñar el papel de donadores de hidrógeno, al mostrar una mayor actividad CAR-ABTS. Los compuestos generados durante el proceso podrían desempeñar un papel antioxidante, al inducir la extinción de radicales mediante el mecanismo de transferencia de átomos de hidrógeno o de su reducción directa por transferencia de electrones (Qi y col., 2024).

Poder reductor

El poder reductor es un método que mide la reducción de iones férricos (Fe^{3+}) al complejo ferroso intensamente azul (Fe^{2+}) por medio de antioxidantes en ambientes ácidos (Munteanu y Apetrei, 2021). En el presente estudio, se encontró un aumento significativo ($P \leq 0.05$), del poder reductor de ambas enzimas utilizadas, de ≈ 3.9 veces para PAL® y ≈ 3.36 veces para HT proteolitic®, lo que indica que los péptidos generados por la hidrólisis enzimática representan una excelente fuente donadora de electrones. Xie y col. (2021), en su estudio sobre colágeno hidrolizado, evaluaron el mismo método, encontrando valores de absorbancia ($\text{UA}_{700 \text{ nm}}$) entre 0.149 y 0.323, similares a los del presente estudio. La composición de los residuos de aminoácidos en los péptidos es uno de los factores importantes que afectan a la actividad antioxidante de las cadenas polipeptídicas. Se ha demostrado que los aminoácidos glicina (Gly) y prolina (Pro), ambos abundantes en el colágeno, desempeñan un papel importante en la capacidad de eliminación de radicales libres en ciertos péptidos (Wang y

col., 2013). Además, los residuos aromáticos e hidrofóbicos hallados en los hidrolizados de colágeno, mostraron una alta eficiencia en atrapar radicales libres debido a su facilidad para donar átomos de hidrógeno (Xie y col., 2021).

CONCLUSIONES

La optimización del proceso de hidrólisis del colágeno bovino con las endoproteasas comerciales PAL® y HT proteolitic® presentaron un grado de hidrólisis extensivo (76.38 % y 72.15 %, respectivamente). Los modelos polinómicos de segundo orden generados explicaron entre 93 % y 96 % la variabilidad de los datos experimentales. Los hidrolizados de colágeno mejoraron significativamente en su solubilidad, así como en la capacidad y estabilidad de emulsificación, sin embargo, disminuyeron en la capacidad y estabilidad de espumado. La asociación directa entre el colágeno hidrolizado y las actividades antioxidantes de los péptidos generados por la hidrólisis enzimática, indica que el colágeno hidrolizado, obtenido bajo las condiciones de optimización, presentó propiedades tecnofuncionales y antioxidantes mejoradas, lo que sugiere una potencial aplicación como ingrediente funcional en sistemas alimentarios, que debe ser comprobada mediante estudios específicos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto de Innovación Ciencia y Emprendimiento para la Competitividad del estado de Guanajuato, por el financiamiento otorgado al proyecto con clave IDEAGTO/CONV/099/2023.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declararon no tener conflictos de intereses de ningún tipo.

REFERENCIAS

- Adler-Nissen, J. (1979). Determination of the degree of hydrolysis of food protein hydrolysates by trinitrobenzenesulfonic acid. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 27(6), 1256-1262. <https://doi.org/10.1021/jf60226a042>
- Aguirre-Cruz, G., León-López, A., Cruz-Gómez, V., Jiménez-Alvarado, R., & Aguirre-Álvarez, G. (2020). Collagen Hydrolysates for Skin Protection: Oral Administration and Topical Formulation. *Antioxidants*, 9(2), 181. <https://doi.org/10.3390/antiox9020181>
- Ahmad, M. I., Li, Y., Pan, J., Liu, F., Dai, H., Fu,

- Y., Huang, T., Farooq, S., & Zhang, H. (2024). Collagen and gelatin: Structure, properties, and applications in food industry. *International Journal of Biological Macromolecules*, 254, 128037. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128037>
- Anzani, C., Álvarez, C., & Mullen, A. M. (2020). Assessing the effect of Maillard reaction with dextran on the techno-functional properties of collagen-based peptides obtained from bovine hides. *LWT*, 118, 108800. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108800>
- AOAC, Association of Official Analytical Chemists (2000). Official Methods of Analysis (Seventeenth edition). AOAC International.
- Barzideh, Z., Abd-Latif, A., Gan, C. Y., Abedin, Md. Z., & Alias, A. K. (2014). ACE Inhibitory and Antioxidant Activities of Collagen Hydrolysates from the Ribbon Jellyfish (*Chrysaora* sp.). *Food Technology and Biotechnology*, 52(4), 495-504. <https://doi.org/10.17113/ftb.52.04.14.3641>
- Bhuimbar, M. V., Jalkute, C. B., Bhagwat, P. K., & Dandge, P. B. (2024). Purification, characterization and application of collagenolytic protease from *Bacillus subtilis* strain MPK. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 138(1), 21-28. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2024.03.003>
- Blanco, M., Vázquez, J. A., Pérez-Martín, R. I., & G. Sotelo, C. (2019). Collagen Extraction Optimization from the Skin of the Small-Spotted Catshark (*S. canicula*) by Response Surface Methodology. *Marine Drugs*, 17(1), 40. <https://doi.org/10.3390/md17010040>
- Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72(1-2), 248-254. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)
- Chi, C., Hu, F., Li, Z., Wang, B., & Luo, H. (2016). Influence of Different Hydrolysis Processes by Trypsin on the Physicochemical, Antioxidant, and Functional Properties of Collagen Hydrolysates from *Sphyrna lewini*, *Dasyatis akiei*, and *Raja porosa*. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 25(5), 616-632. <https://doi.org/10.1080/10498850.2014.898004>
- Chi, C. F., Cao, Z. H., Wang, B., Hu, F. Y., Li, Z. R., & Zhang, B. (2014). Antioxidant and Functional Properties of Collagen Hydrolysates from Spanish Mackerel Skin as Influenced by Average Molecular Weight. *Molecules*, 19(8), 11211-11230. <https://doi.org/10.3390/molecules190811211>
- Deng, G., Huang, K., Jiang, X., Wang, K., Song, Z., Su, Y., Li, C., Zhang, S., Wang, S., & Huang, Y. (2023). Developments for collagen hydrolysates as a multifunctional antioxidant in biomedical domains. *Collagen and Leather*, 5(1), 26. <https://doi.org/10.1186/s42825-023-00131-9>
- González-Serrano, D. J., Hadidi, M., Varcheh, M., Jelyani, A. Z., Moreno, A., & Lorenzo, J. M. (2022). Bioactive Peptide Fractions from Collagen Hydrolysate of Common Carp Fish Byproduct: Antioxidant and Functional Properties. *Antioxidants*, 11(3), 509. <https://doi.org/10.3390/antiox11030509>
- Hema, G. S., Joshy, C. G., Shyni, K., Chatterjee, N. S., Ninan, G., & Mathew, S. (2017). Optimization of process parameters for the production of collagen peptides from fish skin (*Epinephelus malabaricus*) using response surface methodology and its characterization. *Journal of Food Science and Technology*, 54(2), 488-496. <https://doi.org/10.1007/s13197-0172490-2>
- Hong, G. P., Min, S. G., & Jo, Y. J. (2019). Anti-Oxidative and Anti-Aging Activities of Porcine By-Product Collagen Hydrolysates Produced by Commercial Proteases: Effect of Hydrolysis and Ultrafiltration. *Molecules*, 24(6), 1104. <https://doi.org/10.3390/molecules24061104>
- Hu, G., Li, X., Su, R., Corazzin, M., Liu, X., Dou, L., Sun, L., Zhao, L., Su, L., Tian, J., & Jin, Y. (2023). Effects of ultrasound on the structural and functional properties of sheep bone collagen. *Ultrasonics Sonochemistry*, 95, 106366. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106366>
- Lambré, C., Barat-Baviera, J. M., Bolognesi, C., Cocconcelli, P. S., Crebelli, R., Gott, D. M., Grob, K., Lampi, E., Mengelers, M., Mortensen, A., Rivière, G., Steffensen, I., Tlustos, C., Van Loveren, H., Vernis, L., Zorn, H., Herman, L., Aguilera, J., Andryszkiewicz, M., Fernandez-Fraguas, C., Liu, Y., & Chesson, A. (2023). Safety evaluation of the food enzyme bacillolysin from the non-genetically modified *Bacillus amyloliquefaciens* strain HPN 131. *EFSA Journal*, 21(11), 1-12. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2023.8390>
- León-López, A., Fuentes-Jiménez, L., Hernández-Fuentes, A. D., Campos-Montiel, R. G., & Aguirre-Álvarez, G. (2019). Hydrolysed Collagen from Sheepskins as a Source of Functional Peptides with Antioxidant Activity. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(16), 3931. [https://doi.org/10.3390/](https://doi.org/10.3390/10.3390/molecules190811211)

ijms20163931

Liang, Q., Wang, L., He, Y., Wang, Z., Xu, J., & Ma, H. (2014). Hydrolysis kinetics and antioxidant activity of collagen under simulated gastrointestinal digestion. *Journal of Functional Foods*, 11, 493-499. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2014.08.004>

Montgomery, D. C. (2020). *Design and Analysis of Experiments* (10th edition). Wiley.

Munteanu, I. G. & Apetrei, C. (2021). Analytical Methods Used in Determining Antioxidant Activity: A Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(7), 3380. <https://doi.org/10.3390/ijms22073380>

Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2016). *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments* (Fourth edition). Wiley series in probability and statistics.

Nguyen, B. C., Kha, T. C., Nguyen, K. H. N., & Nguyen, H. M. X. (2021). Optimization of enzymatic hydrolysis of collagen from yellowfin tuna skin (*Thunnus albacares*) by response surface methodology and properties of hydrolyzed collagen. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(4). <https://doi.org/10.1111/jfpp.15319>

Núñez, S. M., Cárdenas, C., Pinto, M., Valencia, P., Cataldo, P., Guzmán, F., & Almonacid, S. (2020). Bovine skin gelatin hydrolysates as potential substitutes for polyphosphates: The role of degree of hydrolysis and pH on water-holding capacity. *Journal of Food Science*, 85(7), 1988-1996. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15299>

Philipps-Wiemann, P. (2018). Proteases—general aspects. In Nunes, C.S. and Kumar, V. (Ed.), *Enzymes in Human and Animal Nutrition* (pp. 257-266). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805419-2.00012-5>

Qi, L., Zhang, H., Guo, Y., Liu, H., & Zhang, C. (2024). Preparation, characterization and antioxidant activity analysis of three Maillard glycosylated bone collagen hydrolysates from chicken, porcine and bovine. *Food Science and Human Wellness*, 13(4), 2002-2013. <https://doi.org/10.26599/FSHW.2022.9250166>

Schmidt, M. M., Fontoura, A. M. da, Vidal, A. R., Dornelles, R. C. P., Kubota, E. H., Mello, R. de O., Cansian, R. L., Demiate, I. M., & Oliveira, C. S. (2020). Characterization of hydrolysates of collagen from mechanically separated chicken meat residue. *Food Science and Technology*, 40(suppl 1), 355-362. <https://doi.org/10.1590/0005-3061.v40n1p355-362>

<https://doi.org/10.1590/fst.14819>

Silvipriya, K., Kumar, K., Bhat, A., Kumar, B., John, A., & Lakshmanan, P. (2015). Collagen: Animal Sources and Biomedical Application. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 123-127. <https://doi.org/10.7324/JAPS.2015.50322>

Song, Y., Fu, Y., Huang, S., Liao, L., Wu, Q., Wang, Y., Ge, F., & Fang, B. (2021a). Identification and antioxidant activity of bovine bone collagen-derived novel peptides prepared by recombinant collagenase from *Bacillus cereus*. *Food Chemistry*, 349, 129143. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129143>

Song, Z., Liu, H., Chen, L., Chen, L., Zhou, C., Hong, P., & Deng, C. (2021b). Characterization and comparison of collagen extracted from the skin of the Nile tilapia by fermentation and chemical pretreatment. *Food Chemistry*, 340, 128139. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128139>

Sosulski, F. W. & Imafidon, G. I. (1990). Amino acid composition and nitrogen-to-protein conversion factors for animal and plant foods. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 38(6), 1351-1356. <https://doi.org/10.1021/jf00096a011>

Sun, S., Gao, Y., Chen, J., & Liu, R. (2022). Identification and release kinetics of peptides from tilapia skin collagen during alcalase hydrolysis. *Food Chemistry*, 378, 132089. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132089>

Tawalbeh, D., Ahmad, W. A. N. W., & Sarbon, N. M. (2023). Effect of ultrasound pretreatment on the functional and bioactive properties of legumes protein hydrolysates and peptides: A comprehensive review. *Food Reviews International*, 39(8), 5423-5445. <https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2069258>

Tawalbeh, D., Kha'sim, M. I., Mhd Sarbon, N., & Sarbon, N. M. (2025). Techno-Functional and Bioactivity Properties of Collagen Hydrolysate and Peptide: A Review. *Food Reviews International*, 1-29. <https://doi.org/10.1080/87559129.2025.2450052>

Ulug, S. K., Jahandideh, F., & Wu, J. (2021). Novel technologies for the production of bioactive peptides. *Trends in Food Science & Technology*, 108, 27-39. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.12.002>

Vidal, A. R., Cansian, R. L., Mello, R. de O., Demiate, I. M., Kempka, A. P., Dornelles, R. C. P., Rodriguez, J. M. L., & Campagnol, P. C. B. (2022). Production of Collagens and Protein Hydrolysates with Antimicrobial and Antioxidant Activity from Sheep Slaughter By-Products. *Antioxidants*, 11(6), 1173. <https://doi.org/10.3390/antiox11061173>

org/10.3390/antiox11061173

Vidal, A. R., Duarte, L. P., Schmidt, M. M., Cansian, R. L., Fernandes, I. A., de-Oliveira-Mello, R., Demiate, I. M., & Dornelles, R. C. P. (2020). Extraction and characterization of collagen from sheep slaughter by-products. *Waste Management*, 102, 838-846. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.12.004>

Vogelsang-O'dwyer, M., Sahin, A. W., Arendt, E. K., & Zannini, E. (2022). Enzymatic Hydrolysis of Pulse Proteins as a Tool to Improve Techno-Functional Properties. *Foods*, 11(9), 1307. <https://doi.org/10.3390/foods11091307>

Wang, B., Wang, Y. M., Chi, C. F., Luo, H. Y., Deng, S. G., & Ma, J. Y. (2013). Isolation and Characterization of Collagen and Antioxidant Collagen Peptides from Scales of Croceine Croaker (*Pseudosciaena crocea*). *Marine Drugs*, 11(11), 4641-4661. <https://doi.org/10.3390/md11114641>

Wolf, K. L., Sobral, P. J. A., & Telis, V. R. N. (2009). Physicochemical characterization of collagen fibers and collagen powder for self-composite film production. *Food Hydrocolloids*, 23(7), 1886-1894. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2009.01.013>

Wulandari, D., Triatmojo, S., Erwanto, Y., & Pranoto, Y. (2016). Physicochemical Properties and Amino Acid and Functional Group Profiles of Gelatin Extracted from Bovine Split Hide Cured by Acid. *Pakistan Journal of Nutrition*, 15(7), 655-661. <https://doi.org/10.3923/pjn.2016.655.661>

Xie, Z., Wang, X., Yu, S., He, M., Yu, S., Xiao, H., & Song, Y. (2021). Antioxidant and functional properties of cowhide collagen peptides. *Journal of Food Science*, 86(5), 1802-1818. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15666>

Yu, F., Zong, C., Jin, S., Zheng, J., Chen, N., Huang, J., Chen, Y., Huang, F., Yang, Z., Tang, Y., & Ding, G. (2018). Optimization of Extraction Conditions and Characterization of Pepsin-Solubilised Collagen from Skin of Giant Croaker (*Nibea japonica*). *Marine Drugs*, 16(1), 29. <https://doi.org/10.3390/md16010029>

Yu, P., & Chen, H. (2014). Optimization of Conditions for Enzymatic Production of Collagen Hydrolysates from a Low-Value *Acaudina molpadioides* and Their Activities. *Journal of Food Biochemistry*, 38(2), 227-235. <https://doi.org/10.1111/jfbc.12041>

Zamorano-Apodaca, J. C., García-Sifuentes, C. O., Carvajal-Millán, E., Vallejo-Galland, B., Scheuren-Acevedo, S. M., & Lugo-Sánchez, M. E. (2020). Biological and functional properties of peptide fractions

obtained from collagen hydrolysate derived from mixed by-products of different fish species. *Food Chemistry*, 331, 127350. <https://doi.org/10.1016/j.foochem.2020.127350>

Zhang, Q., Dhir, A., & Kaur, P. (2022). Circular economy and the food sector: A systematic literature review. *Sustainable Production and Consumption*, 32, 655-668. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.05.010>

Zhang, Q., Wang, Q., Lv, S., Lu, J., Jiang, S., Regenstein, J. M., & Lin, L. (2016a). Comparison of collagen and gelatin extracted from the skins of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) and channel catfish (*Ictalurus punctatus*). *Food Bioscience*, 13, 41-48. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2015.12.005>

Zhang, Y., Ma, L., & Otte, J. (2016b). Optimization of Hydrolysis Conditions for Production of Angiotensin-Converting Enzyme Inhibitory Peptides from Basa Fish Skin Using Response Surface Methodology. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 25(5), 684-693. <https://doi.org/10.1080/10498850.2014.919049>

Zhang, Y., Olsen, K., Grossi, A., & Otte, J. (2013). Effect of pretreatment on enzymatic hydrolysis of bovine collagen and formation of ACE-inhibitory peptides. *Food Chemistry*, 141(3), 2343-2354. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.05.058>



Incremento de temperatura: desafío emergente para la producción de frijol y el control de sus virus y plagas en México

Temperature increase: an emerging challenge for common bean production and the control of its viruses and pests in Mexico

José Luis Anaya-López^{1*}, Elizabeth Chiquito-Almanza¹, Jorge Alberto Acosta-Gallegos¹, Oscar Hugo Tosquy-Valle²

RESUMEN

El frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), cultivo clave para la seguridad alimentaria en México, requiere de condiciones térmicas específicas para su desarrollo reproductivo. En el ciclo otoño-invierno 2024, en ensayos experimentales realizados en el Campo Experimental Bajío del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) se registraron pérdidas totales y parciales en siembras de frijol de diversas variedades, coincidentes con las temperaturas récord registradas en mayo. Además, se documentó la presencia de "raíz negra" en el cultivo, lo que sugiere la necesidad de estudios específicos para establecer si se están presentando cambios en la dinámica de plagas y enfermedades, relacionados con el estrés térmico. El objetivo de este trabajo fue analizar evidencia científica sobre el impacto del incremento térmico en la fisiología reproductiva de frijol y su relación con la dinámica de enfermedades virales y plagas, como marco teórico para interpretar estos fenómenos emergentes y desarrollar estrategias de mitigación. Las temperaturas elevadas afectan la fisiología reproductiva del frijol y alteran las interacciones planta-patógeno, creando nuevos desafíos fitosanitarios. Ante proyecciones climáticas de condiciones más extremas, se requiere determinar la asociación entre el incremento térmico y las observaciones de campo, desarrollar variedades tolerantes al calor portadoras del gen *bc-3* para resistencia a virus, monitorear virus y plagas emergentes, adaptar tecnologías de manejo integrado basadas en un diagnóstico preciso, e identificar áreas alternativas de producción. Las pérdidas registradas en 2024 en los ensayos experimentales constituyen una alerta sobre el impacto de las altas temperaturas en la seguridad alimentaria de México.

PALABRAS CLAVE: *Phaseolus vulgaris*, estrés térmico, virus emergentes, *Empoasca* spp, seguridad alimentaria.

ABSTRACT

Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) is a key crop for food security in Mexico, which requires specific thermal conditions for its reproductive development. During the fall-winter 2024 cycle, experimental trials conducted at the Bajío Experimental Station of the National Institute of Forestry, Agriculture and Livestock Research (INIFAP) recorded total and partial losses in common bean plantings of diverse varieties, coinciding with record high temperatures recorded in May. Additionally, the presence of "top necrosis" has been documented in the crop, suggesting the need for specific studies to establish whether changes in pest and disease dynamics related to thermal stress are occurring. The objective of this work was to analyze scientific evidence on the impact of thermal increase on common bean reproductive physiology and its relationship with viral diseases and pest dynamics, as a theoretical framework to interpret these emerging phenomena and develop mitigation strategies. Elevated temperatures affect common bean reproductive physiology and alter plant-pathogen interactions, creating new phytosanitary challenges. Given climate projections of more extreme conditions, it is necessary to determine the association between thermal increase and field observations, develop heat-tolerant varieties carrying the *bc-3* gene for virus resistance, monitor emerging viruses and pests, adapt integrated management technologies based on precise diagnosis, and identify alternative production areas. The losses recorded in 2024 in the experimental trials constitute an alert about the impact of high temperatures on food security in Mexico.

KEYWORDS: *Phaseolus vulgaris*, heat stress, emerging viruses, *Empoasca* spp, food security.

*Correspondencia: anaya.jose@inifap.gob.mx/Fecha de recepción: 10 de marzo de 2025/Fecha de aceptación: 4 de septiembre de 2025/ Fecha de publicación: 11 de septiembre de 2025.

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Bajío, km 6.5, carretera Celaya-San Miguel de Allende, Celaya, Guanajuato, México, C. P. 38110. ²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, municipio de Medellín, Veracruz, México, C. P. 94270.

INTRODUCCIÓN

El frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) es de gran importancia cultural y económica en México, donde es un cultivo relevante por superficie sembrada y cuyo grano constituye la principal fuente de proteína vegetal para la población (Jacinto-Hernández y col., 2019). De acuerdo con los datos de los Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA, 2023), los frijoles negros, que agrupa a numerosas variedades de dos tipos principales, Negro brillante y Negro opaco, son los de mayor producción y consumo, seguidas por las de tipo Pinto.

La producción de frijol se ve afectada por temperaturas elevadas durante la floración, ya que impactan negativamente en el rendimiento y la calidad del grano (Rainey y Griffiths, 2005; Suárez y col., 2020). Estudios de modelación predijeron que la región productora de frijol en México era un área crítica, donde los efectos del cambio climático serían intensos y se manifestarían a corto plazo (Medina-García y col., 2016; Beebe y col., 2017). Estas predicciones se confirmaron en mayo de 2024 que, de acuerdo con el Reporte del Clima en México del Servicio Meteorológico Nacional y la Comisión Nacional del Agua (SMN-CONAGUA, 2024), fue el mes más caluroso en la historia de México. Los cambios extremos de temperatura influyen en las epidemias virales al afectar la fisiología de la planta y su interacción ecológica, incrementando la frecuencia y patogenicidad de los virus que las infectan (Trebicki, 2020). Las condiciones climáticas que se presentaron recientemente, particularmente el estrés térmico, podrían repetirse de manera recurrente en los próximos años y alterar la dinámica de plagas y enfermedades del frijol, lo que requiere de estudios dirigidos a documentar el fenómeno.

El objetivo de este trabajo fue analizar la evidencia sobre los efectos de las temperaturas altas en la fisiología reproductiva del frijol y su influencia en la dinámica de plagas y enfermedades virales, así como sus implicaciones para el mejoramiento genético, el manejo integrado y la seguridad alimentaria de México.

Producción de frijol en México: contexto y vulnerabilidad climática

La producción de frijol en México varía según el estado y los tipos preferidos por los consumidores. Zacatecas es el principal productor, seguido por Sinaloa, juntos aportan aproximadamente 50 % de la producción nacional. Nayarit, Chihuahua, Chiapas, Durango, Guanajuato y Veracruz completan el grupo más importante, con un aporte conjunto de 36.2 %. En Zacatecas predomina el cultivo de los frijoles Negro brillante (49.0 %) y Pinto (33.4 %), además de los tipos Flor de mayo y Flor de junio (ambos de color rosita). En Sinaloa se cultiva casi exclusivamente frijol Azufrado (97.3 %), mientras que en Nayarit se produce frijol Pinto (34.2 %), Negro (21.8 %) y Azufrado (21.6 %). Chiapas produce mayormente frijol Negro opaco de grano pequeño (74.6 %), y Veracruz solo cultiva este tipo de frijol. En Chihuahua y Durango predomina el frijol Pinto con 99.0 % y 62.8 %, respectivamente, en tanto que Guanajuato se especializa en los tipos Flor de junio (32.4 %) y Flor de mayo (30.7 %) (FIRA, 2023).

Casi 70 % de la producción nacional se obtiene en el ciclo primavera-verano (PV), mayormente en la región centro-norte (Chihuahua, Coahuila, Durango, Zacatecas, Aguascalientes, San Luis Potosí, Jalisco, Guanajuato y Querétaro), donde se genera aproximadamente 50 % de la producción total nacional en condiciones de temporal de secano. El 30 % restante se cultiva en el ciclo otoño-invierno (OI). En este último ciclo, Sinaloa aporta 50 % de la producción, principalmente en condiciones de riego, mientras que Nayarit contribuye con el 22 %, dos tercios de los cuales se cultivan en temporal bajo humedad residual (FIRA, 2023).

El frijol requiere entre 300 mm y 400 mm de agua durante su ciclo fenológico, característica que ha favorecido su producción en condiciones de temporal en la zona centro-norte del país donde se obtienen rendimientos entre 500 kg/ha y 800 kg/ha. El riego impacta positivamente su productividad con rendimientos entre 1 600 kg/ha y 1 800 kg/ha (FIRA, 2023).

La producción de frijol en México depende en gran medida de las lluvias, lo que la vuelve vulnerable a condiciones de precipitación errática y deficiente. En los últimos 5 años, la escasez de lluvias y su irregular distribución fue un factor determinante para que la producción nacional disminuyera 5 %, tendencia que se agravó en 2022, cuando la producción del ciclo PV se redujo 32.5 % respecto al año anterior (FIRA, 2023). Esta problemática se ha abordado desde una perspectiva de mejoramiento genético durante décadas, y aunque se dispone de variedades tolerantes a estrés hídrico, la mayoría son de tipo Pinto (Anaya-López y col., 2021). No obstante, la vulnerabilidad del frijol a las altas temperaturas recién está cobrando relevancia. En distintas partes del mundo, incluido México, se realizan investigaciones para identificar fuentes de tolerancia (Suárez y col., 2020; Anaya-López y col., 2022; Appiah-Kubi y col., 2022).

El mejoramiento genético de frijol en México enfrenta desafíos particulares. La diversidad de tipos de frijol demandados por los consumidores y la variedad de condiciones agroclimáticas en las que se producen (Rodríguez-Licea y col., 2010; Espinosa-García y col., 2021) representan un reto importante. Las fuentes de tolerancia a factores bióticos, y particularmente abióticos, en esta especie, son limitadas; y su cruzamiento produce segregantes con una amplia variación de formas, tamaños y colores sin demanda comercial (Beebe y col., 2009).

El trabajo del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) es fundamental en el desarrollo de variedades mejoradas para las distintas regiones productoras del país (Anaya-López y col., 2021). De las 100 variedades registradas en el Catálogo Nacional de Variedades Vegetales, 80 fueron desarrolladas por el INIFAP. Entre estas destacan 'Negro Jamapa', 'Mayocoba', 'Azufrado Higuera', 'Flor de Junio Marcela' y 'Pinto Saltillo', consideradas referentes nacionales por su demanda por los consumidores (Rodríguez-Licea y col., 2010; Espinosa-García y col., 2021).

Para incrementar la precisión de selección y acelerar el desarrollo de nuevas variedades, en el INIFAP se han incorporado marcadores moleculares ligados a genes de interés específico. Destacan los que confieren resistencia a roya y antracnosis (ambas, enfermedades de origen fúngico), a diferentes virus, así como al oscurecimiento lento de la testa, un carácter de calidad importante en frijol (Anaya-López y col., 2021). En relación con la resistencia a virus, desde 2012, el Campo Experimental Bajío (Guanajuato), en colaboración con las sedes de Coahuila (Veracruz) y Santiago Ixcuintla (Nayarit), adoptaron como política que las nuevas variedades de frijol desarrolladas por el Programa de Mejoramiento de frijol, incorporaran marcadores ligados al gen *I* (Anaya-López y col., 2021). Las 5 variedades liberadas por dichos centros en el periodo 2018-2025 portan este gen (Jiménez-Hernández y col., 2018; Anaya-López y col., 2021; Anaya-López y col., 2025b; Tosquy-Valle y col., 2025). Sin embargo, la incorporación del gen *I* depende de la disponibilidad de fuentes parentales que permitan una introgresión eficiente en términos de tiempo de desarrollo, y de priorizar la resistencia viral sobre otros caracteres en función de la incidencia de virus en la región a las que está destinada la variedad, así como de la disponibilidad de recursos económicos por restricciones presupuestarias futuras (Acosta-Gallegos y col., 2021).

El gen *I*, naturalmente presente en diversos genotipos, confiere resistencia al virus del mosaico común del frijol (BCMV, por sus siglas en inglés: bean common mosaic virus) y reduce la diseminación del virus de la necrosis y del mosaico común del frijol (BCMNV, bean common mosaic necrosis virus). El Programa de Mejoramiento de frijol, mediante estrategias de mejoramiento genético, también incorpora en sus variedades desarrolladas el gen *bc-3*, de resistencia a BCMV y BCMNV (Drijfhout y col., 1978), y el gen *bgm-1*, que reduce el mosaico y el amarillamiento sistémico producidos por el virus del mosaico amarillo dorado del frijol (BGYMV, por sus siglas en inglés: bean golden yellow mosaic virus) (Morales y Niessen, 1988).

La primera variedad de frijol en México desarrollada mediante selección asistida por marcadores moleculares, a la que se le incorporó el gen *I*, fue 'Dalia' de tipo Flor de Junio (Acosta-Gallegos y col., 2014). Otras variedades más recientes, que también contienen este gen, son: 'Salinas' de tipo Pinto (Jiménez-Hernández y col., 2018), 'San Blas' (Acosta-Gallegos y col., 2020), 'Rubí' (Ibarra-Pérez y col., 2022) y 'Rincón Grande' (Tosquy-Valle y col., 2025) de tipo Negro opaco, y 'San Luis 22' de tipo Negro brillante (Anaya-López y col., 2025b). De estas, 'San Blas' porta además el gen *bc-3*, y 'Rubí' el gen *bgm-1*, lo que les confiere resistencia a los virus prevalentes en sus regiones objetivo. Las principales características y genes de resistencia de las variedades de frijol desarrolladas hasta el 2021 por el INIFAP fueron reportadas en el artículo de Anaya-López y col. (2021).

La incorporación del gen *I* en las variedades de frijol, como estrategia para reducir las pérdidas ocasionadas por BCMV y BCMNV y limitar su diseminación, tiene implicaciones importantes en el contexto del calentamiento global que serán discutidas más adelante.

Temperaturas extremas: una amenaza emergente

Estudios de modelación realizados por el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT, 2015) indican que el estrés térmico será la restricción abiótica con mayor probabilidad de limitar la productividad de frijol a escala global, incluido México. Estimaciones actuales de la Organización Meteorológica Mundial (WMO, por sus siglas en inglés: World Meteorological Organization (2024) prevén que entre 2024 y 2028, la temperatura media global será 1.1 °C a 1.9 °C superior al periodo de referencia de 1850-1900, con 86 % de probabilidad de que se alcance un nuevo máximo histórico por encima del registro de 2023, que es el año más cálido documentado. Las plantas, al ser organismos sésiles (inmóviles), son particularmente vulnerables al estrés térmico cuando se exponen a temperaturas superiores a su óptimo por periodos prolongados. Este estrés afecta

los procesos fisiológicos, el crecimiento y el desarrollo, causando alteraciones en la floración, desincronización reproductiva y pérdida de estructuras reproductivas (Vargas y col., 2021).

El frijol tiene una temperatura base mínima de 8.3 °C, con un máximo óptimo de 25 °C (Barrios-Gómez y López-Castañeda, 2009). Esta leguminosa se desarrolla de manera óptima entre 10 °C y 21 °C. Temperaturas superiores a 30 °C/20 °C (día/noche) durante la floración causan la esterilidad del polen y el aborto de botones, flores, embriones y vainas, por lo que afectan el rendimiento y la calidad del grano hasta en un 60 % (Rainey y Griffiths, 2005; Suárez y col., 2020). La disminución de la producción, calidad y rendimiento se manifiesta a través del incremento en el porcentaje de semillas arrugadas, y reducción en el tamaño y número de semillas, número de vainas, peso promedio de las semillas y del número de semillas por vaina (Rainey y Griffiths, 2005). La exposición de flores de frijol recién abiertas a 35 °C durante 2 d reduce alrededor de 50 % la viabilidad del polen (Weaver y col., 1985), mientras que la exposición por 5 d a 32 °C y 27 °C (día/noche) previo a la antesis impide la producción de vainas con semillas maduras (Gross y Kigel, 1994).

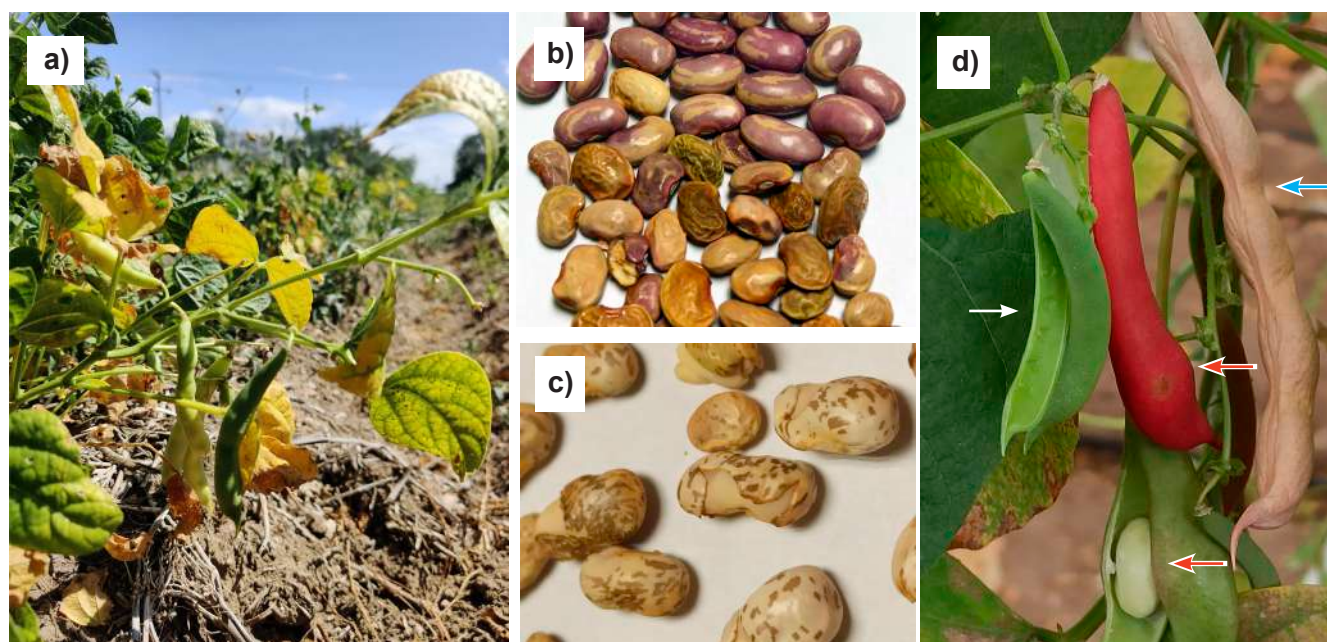
El clima de El Bajío permite sembrar frijol bajo condiciones de riego en el ciclo OI. En Guanajuato, las fechas recomendadas para su siembra en este ciclo son del 1 de febrero al 10 de marzo (Acosta-Gallegos y col., 2013). En 2024, la mayor parte del territorio nacional enfrentó temperaturas sin precedentes, con récord histórico de un promedio de 27 °C en mayo (SMN-CONAGUA, 2024).

El efecto de estas temperaturas récord en la fisiología reproductiva y el rendimiento de frijol se confirmó en el Campo Experimental Bajío (CEBAJ) del INIFAP en Celaya, Guanajuato, donde Prado-García y col. (2025) evaluaron 100 genotipos, incluidas variedades mejoradas, nativas y líneas experimentales de distintos tipos de frijol. El estudio se desarrolló en 2024, durante los dos ciclos de cultivo: OI,

y PV, lo que permitió evaluar la respuesta de los genotipos bajo tres condiciones de crecimiento contrastante. En el ciclo OI (febrero-mayo), correspondiente a la época seca, las condiciones de riego completo posibilitaron analizar el estrés por altas temperaturas, en tanto que la presencia de altas temperaturas y sequía terminal durante esa época permitió evaluar el estrés combinado. Por otra parte, la época de lluvias, en el ciclo PV (julio-octubre) proporcionó condiciones óptimas (control). La etapa reproductiva del cultivo, durante la época seca, ocurrió entre abril y mayo, y de acuerdo con la Red de Estaciones Agroclimáticas del estado de Guanajuato de la Fundación Guanajuato Produce (FGP, 2025), mayo fue el mes más cálido del año. En el CEBAJ, las temperaturas promedio diurnas y nocturnas durante ese mes, fueron de 30.7 °C y 22 °C, con máximas de 37.4 °C y 33.1 °C, res-

pectivamente. Estas condiciones extremas de calor indujeron pérdidas de rendimiento, que se manifestaron en el aborto de embriones y la reducción del número de vainas y de granos por vaina, además del deterioro de la calidad de la semilla (Figuras 1a-1d). Aunque algunos materiales genéticos lograron producir bajo esas condiciones, los estragos fueron significativos: de 100 genotipos, 42 no produjeron semilla. De estos últimos, 9 no desarrollaron flores. En el resto se observó aborto de flores y vainas pequeñas que contenían 1 o 2 semillas de baja calidad y tamaño.

El rendimiento promedio de los 58 genotipos que produjeron semilla, en ambos tratamientos, fue de 889 kg/ha en riego (estrés por altas temperaturas) y 317 kg/ha en sequía terminal (estrés combinado) (Prado-García y col., 2025). Estos rendimientos fueron significativa-



a) Reducción del número de vainas y granos por vaina en una variedad de hábito determinado bajo condiciones de riego; b) Arrugamiento del grano de una variedad de tipo Flor de junio; c) Arrugamiento del grano de una variedad de tipo pinto; d) Aborto de embriones (flecha blanca) y reducción del número de granos por vaina (flechas rojas) en comparación con desarrollo óptimo (vaina de color pajizo; flecha celeste) en frijol criollo de hábito indeterminado.

■ **Figura 1. Efecto de las temperaturas altas en la producción de frijol durante el ciclo otoño-invierno 2024 en el Campo Experimental Bajío.**

Figure 1. Effect of high temperatures on common bean production during the fall-winter 2024 cycle at Bajío Experimental Station.

mente inferiores al rendimiento promedio nacional de 1 700 kg/ha para condiciones de riego y 650 kg/ha para temporal (FIRA, 2023).

En contraste, en el ciclo de temporal PV de 2024, la etapa reproductiva ocurrió entre septiembre y octubre. En septiembre, el mes más cálido, las temperaturas promedio diurnas y nocturnas fueron 23.3 °C y 17.8 °C, con máximas de 30.0 °C y 23.9 °C, respectivamente (FGP, 2025), lo que sugiere que este ciclo es el más adecuado para evadir las pérdidas causadas por temperaturas altas. Sin embargo, es importante considerar que, las predicciones realizadas por Medina-García y col. (2016), basadas en modelos climáticos, indican un incremento de 1.1 °C a 2.6 °C en la temperatura promedio entre mayo y octubre en las principales regiones productoras de frijol de temporal en México hacia los años 2030, 2050 y 2070. Los autores consideran que dicho incremento, junto con la disminución de la precipitación, reducirá la superficie con potencial alto para este cultivo.

Los resultados obtenidos por Prado-García y col. (2025), indican que el incremento de la temperatura en el año 2024 indujo la inhibición total en la producción de granos de diferentes variedades, así como fuertes reducciones en el rendimiento de las variedades que mostraron distintos niveles de resistencia al calor y la sequía. Estos resultados coin-

cidieron con observaciones de campo realizadas por técnicos de la FGP y de la Secretaría del Campo de Guanajuato (SECAM) en el ciclo OI 2024 en parcelas de riego. Los técnicos detectaron pérdidas totales en lotes de frijol a los que daban seguimiento, en los municipios de Salvatierra, Irámucó, Jaral del Progreso y Valle de Santiago, Guanajuato (Héctor Valencia Morales, líder de proyectos de FGP, Celaya, Guanajuato, comunicación personal, 2 de septiembre, 2025; Luis Manuel Rojas Tovar, Agente Técnico de SECAM, Celaya, Guanajuato, comunicación personal, 3 de septiembre, 2025). La coincidencia existente entre la evidencia científica (Prado-García y col., 2025), los datos climáticos que reportaron altas temperaturas durante abril y mayo y las observaciones de campo, mostraron discrepancia con los reportes oficiales (Tabla 1), lo que señala la necesidad de fortalecer los sistemas de documentación de siniestros agrícolas.

Las estaciones climáticas ubicadas en los municipios de Acámbaro, Celaya, Jaral del Progreso, Salvatierra y Valle de Santiago, reportaron que los datos presentados corresponden a las temperaturas máximas diurnas y nocturnas. Las diurnas, estuvieron entre 35.2 °C y 37.4 °C, y las nocturnas entre 30.7 °C y 33.7 °C. Acámbaro fue, en promedio, 2.3 °C más fresco (FGP, 2025). Dichas condiciones térmicas exceden los umbrales críticos para

■ **Tabla 1. Registro de la superficie sembrada, cosechada y siniestrada de frijol en Guanajuato durante el ciclo otoño-invierno 2024 (SIAP, 2025a; 2025b).**

Table 1. Record of planted, harvested, and damaged bean area in Guanajuato during the fall-winter 2024 cycle (SIAP, 2025, 2025a; 2025b).

Fecha	Superficie* (ha)			Producción* (T)	Rendimiento*
	Sembrada	Cosechada	Siniestrada		
Febrero	682	0.00	0.00	0.00	0.00
Marzo	1 061	0.00	0.00	0.00	0.00
Abril	1 061	0.00	0.00	0.00	0.00
Mayo	1 061	1 061	0.00	2 594.51	2.45
Junio	1 061	1 061	0.00	2 594.51	2.45
Julio	1 061	1 061	0.00	2 594.51	2.45

*El reporte se realiza como cifra acumulada.

la formación de vainas y llenado de grano (Rainey y Griffiths, 2005; Suárez y col., 2020), y coincidieron temporalmente con la etapa reproductiva de las siembras de frijol establecidas en esas localidades. El hecho de que fueran siembras de riego indica que la causa de pérdidas se asoció a las altas temperaturas de la región en el periodo.

Los reportes mensuales de avance de siembras y cosechas de frijol en Guanajuato, para el ciclo OI 2024, proporcionados por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2025a; 2025b) muestran que se establecieron 682 ha de frijol en febrero con un acumulado de 1 061 ha en marzo, lo que indica que se sembraron 379 ha en este último mes (Tabla 1). En cuanto a la producción alcanzada, el reporte oficial de cierre al 31 de julio documenta una producción de 2 594.51 T, sin que haya registro de hectáreas siniestradas.

Considerando que las fechas de siembra recomendadas para frijol en la región son del 1 de febrero al 10 de marzo, y que este cultivo tiene un ciclo productivo de 110 d (Acosta-Gallegos y col., 2013), las siembras tempranas del 1 de febrero (682 ha) debían cosecharse el 21 de mayo. Al cierre de ese mes se registró una producción de 2 594.51 T (Tabla 1). Mientras que las siembras tardías, del 1 al 10 de marzo (379 ha), que representaron el 35.7 % de la superficie sembrada, debieron completarse el 19 de junio. Sin embargo, el reporte oficial de cierre al 30 de junio documenta una producción acumulada de 2 594.51 T, lo que implica la ausencia de producción en el periodo de siembras tardías. La omisión del reporte de producción en el mes de junio y de superficie siniestrada sugieren que las superficies no cosechadas pueden ser omitidas de su clasificación como siniestro cuando las causas específicas no son identificadas sistemáticamente en campo. Esto podría considerarse como una limitación metodológica importante del sistema oficial de registro de pérdidas agrícolas, especialmente para las condiciones climáticas que se están presentando globalmente y que afectan la producción de frijol.

El fenómeno emergente de calor de 2024 alertó sobre la vulnerabilidad del frijol a las temperaturas extremas y motiva a que, además de registrar en las bases de datos oficiales las pérdidas de los cultivos, se documenten a profundidad las causas que las originan para establecer una línea base que permita tomar medidas preventivas o correctivas evitando que el problema se generalice. Es importante motivar la participación de expertos para plantear hipótesis, diseñar estudios específicos y generar información precisa.

Mejoramiento genético

Para reducir el impacto del cambio climático en el cultivo del frijol en México, es necesario implementar estrategias como prácticas agro-nómicas, desarrollar variedades tolerantes a temperaturas altas y a baja disponibilidad hídrica, producir en zonas y temporadas con regímenes térmicos e hídricos más favorables o introducir cultivos alternativos tolerantes, que tengan aceptación comercial por parte del consumidor al que va dirigido. De estos últimos destacan el caupí (*Vigna unguiculata* L.), del que se han identificado variedades que mantienen la viabilidad del polen hasta 41 °C (Weaver y col., 1985) y el frijol Tépari (*Phaseolus acutifolius* A. Gray) que es tolerante al estrés hídrico y térmico; y compatible con *P. vulgaris* (Barrera y col., 2024).

En relación con el mejoramiento genético, destacan dos opciones principales: identificar germoplasma de frijol (*P. vulgaris*) tolerante, o realizar cruza interespecíficas con especies tolerantes como *P. acutifolius*. Tene y col. (2023) evaluaron 196 genotipos del género *Phaseolus*, e identificaron 5 de *P. vulgaris*, 2 de *P. lunatus*, 1 de *P. coccineus* y 1 de *P. acutifolius* resistentes, tanto a condiciones de estrés moderado en campo (máximas de 29.9 °C) como a estrés extremo en invernadero (máximas de 43.9 °C). Por su parte, Rose y col. (2023) identificaron una línea de tipo Andino (HTA4), derivada de la cruza entre *P. vulgaris* y *P. acutifolius*, tolerante a 31 °C/24 °C (día/noche), cuyo mecanismo de tolerancia se asoció a la germinación exitosa del estigma,

y al mantenimiento de la viabilidad del polen. Si bien, estos resultados son prometedores, en ninguno de los dos estudios se indicaron los rendimientos ni la calidad del grano, por lo que deben tomarse con precaución. Además, la tolerancia a factores abióticos, como el estrés térmico y la sequía, involucra mecanismos genéticos complejos controlados por múltiples genes, lo que puede complicar el mejoramiento (Lone y col., 2021). Esto contrasta con la resistencia al estrés biótico, que típicamente presenta una herencia monogénica y, en algunos casos, hay marcadores moleculares ligados o asociados al gen de interés que facilitan su selección (Assefa y col., 2019).

Los avances en tolerancia a temperaturas altas en México son incipientes, siendo los genotipos tolerantes identificados en el ciclo OI 2024 en el CEBAJ (Prado-García y col., 2025) el progreso más significativo. Hasta ahora, el Programa de Mejoramiento de Frijol del INIFAP ha priorizado la tolerancia a sequía como factor determinante del rendimiento (Anaya-López y col., 2021). Sin embargo, en el contexto del cambio climático se debe considerar también la tolerancia al calor. Esta característica es crucial en ambientes donde ambos estreses ocurren simultáneamente, como documentaron Appiah-Kubi y col. (2022), quienes evaluaron 40 variedades de frijol tolerantes a sequía en el ciclo PV, y confirmaron que solo aquellas que toleraban temperaturas altas completaron su desarrollo reproductivo, independientemente del manejo de fósforo y riego. Ello indica que, si el incremento de temperatura en las regiones productoras de frijol en México sobrepasa los umbrales de tolerancia durante el ciclo PV, las consecuencias serán críticas independientemente de la disponibilidad de agua.

Efectos del cambio climático en la dinámica de plagas y enfermedades virales

Las alteraciones climáticas afectan la prevalencia, distribución e intensidad de plagas y enfermedades vegetales mediante múltiples mecanismos, donde la temperatura y la precipitación pluvial son factores críticos (Sharma y

col., 2020; Alfizar y Nasution, 2024). El cambio climático puede incrementar la vulnerabilidad de las plantas a plagas y patógenos actualmente limitados por condiciones climáticas desfavorables, y propiciar la emergencia de patógenos preexistentes como agentes causales de enfermedades (Reddy, 2018; Sharma y col., 2020). Investigaciones de campo sobre la incidencia estacional de insectos plaga en girasol mostraron correlación positiva significativa entre la temperatura y las poblaciones de mosquita blanca (*Bemisia tabaci* Genn.) y chicharrita (*Empoasca* spp) (Basit y col., 2016). De manera similar, en frijol mungo (*Vigna radiata* L.), las poblaciones de *B. tabaci* y áfidos también tuvieron una correlación positiva con la temperatura, y negativa con la humedad y las precipitaciones (Gehlot y Prajapat, 2021).

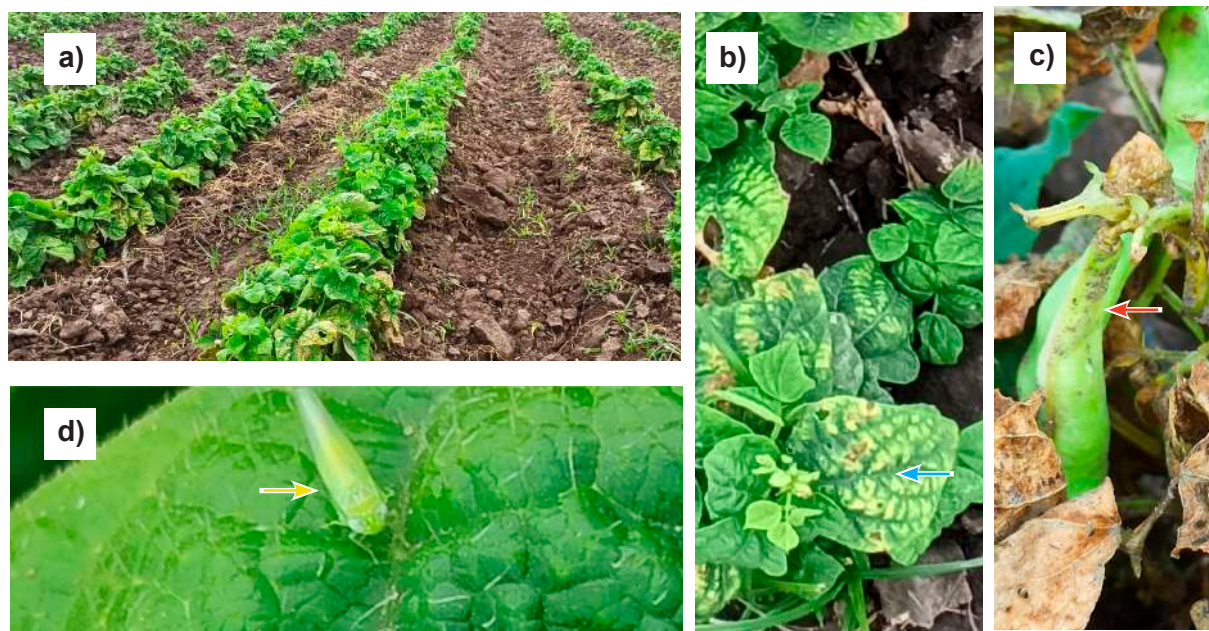
La manera en que el incremento de temperatura afectará la dinámica de los insectos plaga puede variar en función del clima de cada región. Se prevé que especies confinadas a regiones tropicales y subtropicales se extenderán a zonas templadas, mientras que algunas especies vulnerables a temperaturas altas podrían disminuir en las regiones templadas (Deutsch y col., 2018). Esto se debe a que las regiones templadas no tienen la temperatura óptima para su desarrollo, por lo que los insectos crecerán más rápido con el aumento de temperatura; mientras que en los trópicos, al estar cerca de su óptimo, las poblaciones crecerán más lentamente cuando la temperatura se eleve demasiado.

No obstante, anticipar los efectos del calentamiento global en los insectos es complejo. El estudio realizado por Lehmann y col. (2020) concluye que, la amenaza que representan como plagas puede no aumentar de manera uniforme debido a las necesidades específicas de nicho, tolerancias fisiológicas y efectos variables de la temperatura en su fenología y ciclo de vida, por lo que la mitigación de sus efectos requiere comprender mejor las respuestas de especies individuales y los mecanismos ecológicos subyacentes. Esta eviden-

cia también sugiere la necesidad de un monitoreo constante.

Entre los principales insectos plaga del frijol destacan la mosquita blanca (*B. tabaci*) y las chicharritas del género *Empoasca*. De esta última, en un mismo campo pueden coexistir varias especies, como se documentó en Cuba con *E. kraemeri* Ross y Moore, *E. fabae* Harris y *E. papayae* Oman (Sánchez-Castro y col., 2016). Aunque no se ha demostrado que el género *Empoasca* transmita virus al frijol, *E. kraemeri* causa toxemia severa al inyectar toxinas salivales (Backus y col., 2005). Por otra parte, *E. papayae* tiene la capacidad de transmitir fitoplasmas y el virus de la meilitra (PeMV) a la papaya, lo que destaca la importancia de su correcta identificación taxonómica, para estudiar su epidemiología y desarrollar estrategias de control.

Aunque no hay publicaciones que muestren un incremento en la incidencia de la chicharrita (*Empoasca* spp) en el cultivo de frijol en México, diferentes investigadores que laboran en los campos de investigación del INIFAP consideran que este insecto podría emerger como plaga relevante en varios estados. En 2023, en Durango, se presentó una infestación sin precedentes que requirió aplicaciones múltiples de insecticida (José C. Jiménez-Galindo, investigador del INIFAP, Cuauhtémoc, Chihuahua, comunicación personal, 8 de agosto, 2024). El problema se ha observado también en parcelas experimentales y comerciales en Guanajuato (Figura 2a-2d) y Querétaro (Jorge A. Acosta-Gallegos, investigador del INIFAP, Celaya, Guanajuato, comunicación personal, 20 de noviembre, 2024), mientras que en Nayarit su incidencia es recurrente (Nadia C. García-Álvarez, investigador del INIFAP, Santiago



a) Aspecto general de daño en un cultivo de frijol bajo condiciones de riego; b) Síntomas de toxemia por chicharrita durante la etapa vegetativa: amarillamiento, deformación y enrollamiento de folíolos, reducción del crecimiento de entre nudos y achaparramiento de plantas (flecha celeste); c) Síntomas de defoliación, necrosis y daño en vainas en la etapa de llenado de vainas (flecha roja); d) Chicharrita (*Empoasca* spp) presente en el cultivo (flecha amarilla).

■ **Figura 2.** Daño por *Empoasca* spp en la producción de frijol durante el ciclo primavera-verano 2024 en el Campo Experimental Bajío.

Figure 2. Damage caused by *Empoasca* spp in common bean production during the spring-summer 2024 cycle at Bajío Experimental Station.

Ixcuintla, Nayarit, comunicación personal, 8 de enero, 2025). Estas observaciones recientes de infestaciones inusuales de *Empoasca* spp podrían estar relacionadas con los cambios en los patrones climáticos, ya que la temperatura es un factor dominante en la regulación de las poblaciones de insectos, lo que requiere de una investigación rigurosa para establecer la relación entre los factores del cambio climático, como la sequía y las temperaturas altas, con la dinámica de las poblaciones insectiles y los virus, toda vez que la mayoría de los virus de plantas son transmitidos por insectos vectores en sistemas biológicos complejos que incluyen múltiples plantas hospederas, virus, vectores y sus endosimbiontes bacterianos. La incidencia temprana y prolongada de clima cálido puede alterar estas interacciones, incrementando el riesgo de nuevas enfermedades virales y brotes en la agricultura y los ecosistemas naturales (Sharma y col., 2020).

El frijol es una de las leguminosas más susceptibles a las enfermedades virales, con pérdidas de rendimiento de hasta 100 %, dependiendo de la época de cultivo, densidad de vectores y especie viral (Morales y Castaño, 2008). En diversas especies vegetales, el incremento en la temperatura ambiental puede potenciar la propagación viral sistémica y de célula a célula (Amari y col., 2021). Además, bajo condiciones de estrés, que reflejan escenarios extremos previstos por el cambio climático, las semillas infectadas pueden ser más viables que las no infectadas, lo que incrementa la prevalencia y persistencia viral en la población hospedante (Gutiérrez-Sánchez y col., 2023).

La temperatura modula las epidemias virales a nivel de micro y macroclima, afectando tanto los procesos en la planta (acumulación y movimiento viral), como las interacciones ecológicas (dinámica y comportamiento de vectores, características del hospedero y supervivencia de reservorios virales) (Sharma y col., 2020; Tsai y col., 2022). Estas alteraciones pueden afectar la virulencia y patogenicidad de los virus de plantas, lo que in-

crementa la frecuencia y escala de los brotes de las enfermedades que producen (Trebicki, 2020).

La complejidad de las interacciones insecto-virus se evidencia en los distintos mecanismos de transmisión. *B. tabaci* transmite al frijol los virus BGMV, BGYMV, el virus del moteado suave del caupí (CPMMV, por sus siglas en inglés: cowpea mild mottle virus) y otros begomovirus (Ferreira y col., 2024); mientras que diversas especies de áfidos transmiten al BCMV y al BCMNV (Morales y Castaño, 2008). Adicionalmente, es frecuente detectar el fenómeno de coinfección, que implica la presencia de varias especies virales en una misma planta. Esto puede resultar en interacciones de neutralismo, sinergismo, antagonismo y sinergismo/antagonismo entre virus, con implicaciones significativas para el desarrollo de enfermedades, la expresión de síntomas y la epidemiología viral (Moreno y López-Moya, 2020; Singhal y col., 2021).

En México, se han detectado infecciones simples y mixtas de BCMV y BCMNV en siembras de frijol en los estados de Guanajuato, Jalisco y Nayarit. En el último se ha identificado además la coinfección con CPMMV, BGYMV y el virus latente del frijol (BLV). De estas especies, BCMV, BCMNV y BGYMV destacan por su incidencia y la severidad de los daños que ocasionan (Chiquito-Almanza y col., 2018; Martínez-Marrero y col., 2020; Chiquito-Almanza 2021). Los principales virus que infectan al frijol, identificados en México, sus mecanismos de transmisión, síntomas que producen y los genes usados en programas nacionales para el mejoramiento de variedades de frijol resistentes se resumen en la Tabla 2.

Aplicar medidas de control adecuadas requiere conocer aspectos biológicos, epidemiológicos, patológicos y ecológicos, tanto de los virus como de sus vectores. BCMV y BCMNV causan mosaico común (Figura 3a) cuando infectan variedades sin genes de resistencia, mientras que el BCMNV produce raíz negra (también conocida como necrosis apical) en varie-

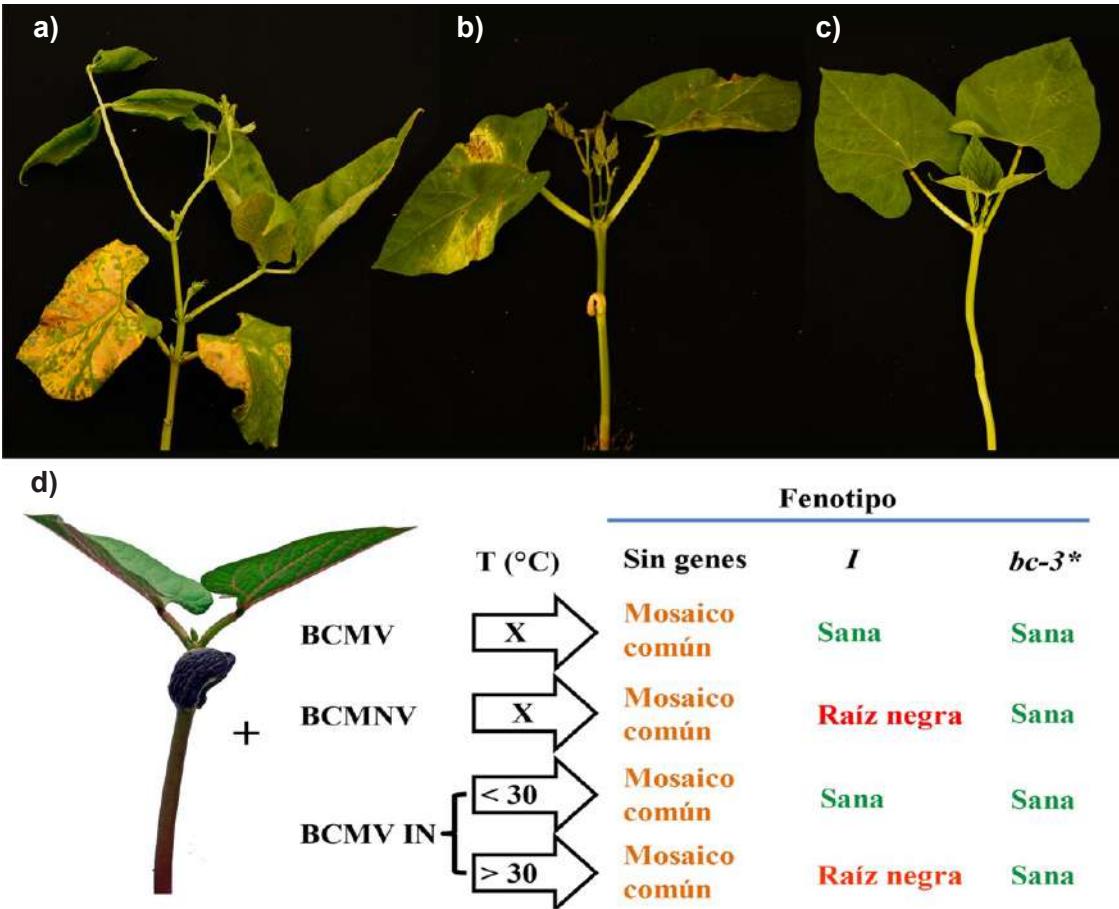
■ Tabla 2. Virus detectados en frijol, insectos vectores, mecanismos de transmisión y principales genes de resistencia usados en el mejoramiento genético en México.

Table 2. Viruses detected in common bean, insect vectors, transmission mechanisms and main resistance genes used in genetic improvement in Mexico.

Acrónimo	Familia/ Género	Síntomas principales	Transmisión	Genes de resistencia	Regiones afectadas
Virus del mosaico común del frijol					
BCMV	Potyviridae/ Potyvirus	Mosaico común en variedades sin genes de resistencia; raíz negra en el caso de algunas cepas inductoras de necrosis sistémica dependiente de la temperatura en interacción con variedades portadoras del gen <i>I</i> sin la protección de genes recesivos.	Semilla infectada y varias especies de áfidos (no persistente)	<i>I</i> , <i>bc-1</i> , <i>bc-2</i> , <i>bc-3</i> , <i>bc-4</i> y <i>bc-u^d</i>	Nacional
Virus de la necrosis del mosaico común del frijol					
BCMNV	Potyviridae/ Potyvirus	Mosaico común en variedades sin genes de resistencia; raíz negra en interacción con variedades portadoras del gen <i>I</i> sin la protección de genes recesivos.	Semilla infectada y varias especies de áfidos (no persistente)	<i>I</i> , <i>bc-1</i> , <i>bc-2</i> , <i>bc-3</i> , <i>bc-4</i> y <i>bc-u^d</i>	Nacional
Virus del mosaico amarillo dorado del frijol					
BGYMV	Geminiviridae/ Begomovirus	Amarillamiento sistémico, aborto floral, deformación de vainas	Mosquita blanca (persistente de manera circulativa)	<i>bgm-1</i>	Trópico, Chiapas y Nayarit
Virus del moteado suave del caupí					
CPMMV	Betaflexivirida/ Carlavirus	Moteado suave, clorosis leve, e infecciones asintomáticas	Mosquita blanca (No persistente)	Desconocidos	Guanajuato, Jalisco y Nayarit

Continúa...

Virus latente del frijol					
BLV	Geminiviridae/ Begomovirus	Asintomático	Desconocida	Desconocidos	Guanajuato, Jalisco, Nayarit y Veracruz
Virus del mosaico severo del frijol					
PvSMV	Secoviridae/ Comovirus	Mosaico severo, síntomas similares a “raíz negra”	Desconocida	Desconocidos	Guanajuato



Plantas inoculadas con la cepa BCMNV NL-3. a) mosaico común en una variedad susceptible (sin genes de resistencia); b) raíz negra en una variedad que porta únicamente el gen *I*; c) resistencia en una variedad que porta los genes *I* + *bc-3*; d) efecto de la temperatura y la especie viral en interacción con los genes de resistencia *bc-3* e *I* en el desarrollo del mosaico común y la raíz negra. X: cualquier temperatura. BCMNV IN: cepas de BCMV inductoras de necrosis sistémica dependiente de la temperatura. Excepto para la cepa BCMV RU1M, que produce raíz negra independientemente de la temperatura. *Para que el gen *bc-3* confiera resistencia requiere la presencia del gen *bc-u*^d).

■ **Figura 3. Respuesta de plantas de frijol portadoras de diferentes genes de resistencia al BCMV y BCMNV, y su interacción con la temperatura.**
Figure 3. Response of common bean plants carrying different resistance genes to BCMV and BCMNV, and their interaction with temperature.

dades portadoras del gen *I* sin la protección de genes recesivos (Figura 3b), al igual que algunas cepas de BCMV por efecto del incremento de temperatura (Figura 3d), como se detalla en la siguiente sección (Drijfhout y col., 1978; Collmer y col., 2000). Los dos virus se han detectado en la mayoría de las regiones productoras de frijol en México (Flores-Estevés y col., 2003; Chiquito-Almanza y col., 2021), y pueden transmitirse al embrión de variedades susceptibles con tasas de hasta 80 %, por lo que la semilla infectada es su principal medio de diseminación. La transmisión secundaria es realizada por diversas especies de áfidos de manera no persistente dentro y fuera del cultivo, lo que favorece la perpetuación del agente etiológico y el inicio de nuevos ciclos de la enfermedad (Morales y Castaño, 2008). El BCMV puede ocasionar una reducción en el rendimiento de entre 53 % y 83 % (Sastry, 2013).

El BGYMV se encuentra principalmente en áreas tropicales como Chiapas y Nayarit (Garrido-Ramírez y col., 2000; Chiquito-Almanza y col., 2021). Los genotipos susceptibles infectados en las primeras etapas de desarrollo presentan amarillamiento sistémico intenso y pueden tener pérdidas totales, debido al aborto de flores y la deformación de las vainas (Morales y Niessen, 1988). En el trópico de México se han reportado pérdidas de rendimiento atribuidas a este virus en variedades susceptibles como 'Negro Jamapa' (87.6 %), 'Negro Tacaná' (18 %) y 'Negro Huasteco-81' (40.5 %) (López-Salinas y col., 1993). La transmisión del BGYMV se realiza de manera persistente por *B. tabaci* con un periodo de latencia de 4 h a 48 h (Morales y Anderson, 2001). La incidencia de la enfermedad y la magnitud de las pérdidas varían dependiendo de las poblaciones del vector, la susceptibilidad de la variedad, las prácticas culturales, y las condiciones ambientales, principalmente la precipitación pluvial, que afectan a las poblaciones de *B. tabaci* (Morales y Anderson, 2001). Adicionalmente, es común que este virus cause deformación y enanismo de la planta, así como aborto de flores en genotipos de frijol de la raza Me-

soamericana, particularmente en condiciones de temperatura alta (Morales y Niessen, 1988).

Los diferentes mecanismos de transmisión y la biología de los virus y vectores determinan las prácticas de manejo. Por ejemplo, para BGYMV, que no se transmite por semilla y requiere un periodo de incubación en el insecto antes de poder transmitirse, las estrategias se basan en reducir las poblaciones del vector mediante insecticidas, barreras vegetales y la siembra en épocas con menor incidencia de mosquita blanca. En contraste, para BCMV y BCMNV, la estrategia de control más adecuada y económica es la resistencia genética, ya que su principal medio de diseminación es la semilla infectada y el control del vector tiene poca eficacia, pues este puede transmitir los virus segundos después de alimentarse de una planta infectada (Morales y Castaño, 2008).

Influencia de temperaturas altas en la ruptura de resistencia a BCMV y BCMNV

La presencia del gen *I* como estrategia de mejoramiento genético de las variedades de frijol desarrolladas por el INIFAP, destinadas a diferentes regiones (Anaya-López y col., 2021), es de gran importancia para la producción de frijol en el país. Sin embargo, la efectividad de esta resistencia puede verse comprometida por factores ambientales, particularmente la temperatura, lo que representa un riesgo potencial para la seguridad alimentaria nacional.

En variedades que portan únicamente el gen *I*, sin la protección de genes recesivos, se produce la raíz negra a cualquier temperatura por la interacción con el BCMNV (Figura 3b) y con algunas cepas de BCMV como la recombinante RU1M (Drijfhout y col., 1978; Collmer y col., 2000; Feng y col., 2014). La combinación del gen *I* con el gen recesivo *bc-3* confiere resistencia al BCMNV (Figura 3c), y a la mayoría de las cepas de BCMV descritas (Drijfhout y col., 1978; Soler-Garzón y col., 2021a; 2021b). El gen *I* induce una respuesta hipersensible contra el BCMNV independientemente de la temperatura (Figura 3d), que resulta en ne-

crosis sistémica y que frecuentemente causa la muerte de la planta, aunque evita la diseminación del virus por medio de la semilla infectada (Drijfhout y col., 1978). Este gen confiere alta resistencia o incluso inmunidad completa a la mayoría de las cepas del BCMV por debajo de 30 °C (Figura 3d). Sin embargo, por encima de esta temperatura, algunas cepas del BCMV como NL2 y NL6, denominadas “cepas inductoras de necrosis dependiente de la temperatura”, inducen síntomas de necrosis sistémica (Figura 3d) (Drijfhout y col., 1978; Collmer y col., 2000).

En 2024, en coincidencia con el calor extremo, se observaron síntomas de necrosis apical en plantas de frijol en los campos experimentales del CEBAJ (Figuras 4a y 4b). Aunque no se confirmó el agente viral responsable, es necesario realizar estudios de identificación, ya que esos síntomas pueden ser causados por diferentes virus, incluyendo BCMNV, ciertas cepas de BCMV u otros virus emergentes como el virus del mosaico severo del frijol (PvSMV). Esta investigación es especialmente importante si las condiciones climáticas extremas persisten.

Los mecanismos moleculares subyacentes a la necrosis inducida por temperatura aún no

están claros. Se ha propuesto que la expresión del gen *I* está regulada negativamente por la temperatura. Como resultado, la cantidad de proteína *I* que se produce es baja para conferir resistencia confiable a temperaturas altas. También es posible que, la respuesta inmune inducida por este gen (y su proteína expresada) se vea atenuada por la temperatura alta (Collmer y col., 2000).

El gen *I* es útil en regiones con baja incidencia de BCMNV, ya que, al morir la planta (por efecto de la respuesta hipersensible), se reduce la diseminación del virus a través de la semilla. Sin embargo, no es adecuado en zonas con temperaturas elevadas o incidencia alta de especies o cepas inductoras de necrosis, como ocurre en Nayarit. Para esas condiciones, se requieren genes recesivos que puedan actuar de forma específica contra cepas virales de interés. Hasta ahora se han identificado 5 genes recesivos que podrían ser utilizados: *bc-1*, *bc-2*, *bc-3*, *bc-4* y *bc-u^d* (Drijfhout y col., 1978; Soler-Garzón y col., 2021a; 2021b).

El gen *bc-3* es el más estudiado, este se encuentra en el cromosoma 6 del frijol y codifica el factor de inicio de la traducción eucariótica 4E (eIF4E). La combinación de *bc-3* y *bc-u^d* puede proteger al frijol de la infección



a) Síntomas de necrosis apical en una variedad de tipo Negro; b) Planta muerta con síntomas similares a raíz negra; c) Síntomas de necrosis inducidos por el virus del mosaico severo del frijol (PvSMV).

■ **Figura 4. Síntomas de necrosis en frijol cultivado durante el ciclo primavera-verano 2024 en el Campo Experimental Bajío, INIFAP.**

Figure 4. Necrosis symptoms in common bean cultivated during the spring-summer 2024 cycle at Bajío Experimental Station, INIFAP.

por todas las cepas de BCMV (Drijfhout y col., 1978), excepto a BCMV-1755a (Feng y col., 2015), y es hasta ahora la mejor opción de resistencia a cepas inductoras de necrosis.

Es importante estudiar el origen de la presencia de raíz negra observada en los lotes experimentales del CEBAJ (Figuras 4a y 4b), para establecer si el fenómeno está relacionado con el aumento de temperatura, en combinación con una mayor incidencia de BCMNV o de cepas de BCMV inductoras de necrosis. Un resultado positivo a esta hipótesis indicaría la necesidad de incorporar el gen *bc-3* en las nuevas variedades. Aunque, también es probable que esté relacionado con el brote de una nueva especie viral.

El virus del mosaico severo del frijol (PvSMV), descubierto por primera vez en el CEBAJ (Chiquito-Almanza y col., 2020) es un comovirus que provoca síntomas similares a raíz negra (Figura 4c), por lo que es crucial confirmar la presencia y distribución de dichas especies virales. Los comovirus típicamente son transmitidos por crisomélidos (Coleoptera: Chrysomelidae) y por medios mecánicos, aunque algunos, como el virus latente 1 de *Arabidopsis* (ArLV1), pueden transmitirse a la semilla (Verhoeven y col., 2023). Esta diversidad en los mecanismos de transmisión resalta la importancia de investigar las vías de transmisión del PvSMV para comprender mejor su epidemiología.

Perspectivas para el manejo integrado bajo el cambio climático

En el escenario actual del cambio climático se requiere implementar estrategias de manejo integrado que consideren tanto los factores bióticos como abióticos que afectan la producción de frijol. El enfoque debe incluir medidas preventivas, sistemas de monitoreo y prácticas adaptativas que permitan mitigar los efectos conjuntos del incremento de temperatura y la variabilidad de las precipitaciones, ya que su efecto combinado es mayor que cuando se presentan individualmente (Appiah-Kubi y col., 2022).

En relación con las plagas, la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria (IPPC, 2021) recomienda prácticas de manejo que incluyen la producción y uso de semillas y materiales libres de patógenos, establecimiento de sistemas de alerta temprana, herramientas de diagnóstico precisas, tratamientos efectivos para las semillas, variedades resistentes, adopción de prácticas culturales que fomenten la sanidad vegetal, manejo integrado de plagas, aplicación rigurosa de medidas de higiene y empleo de productos biológicos para la protección de cultivos.

Mitigar el impacto de la sequía y las altas temperaturas requiere la implementación de medidas a corto y largo plazo. Las medidas a corto plazo se basan en prácticas agronómicas adaptativas relacionadas con el manejo del suelo, el uso de sistemas de riego eficientes y prácticas culturales como la labranza de conservación, el manejo de residuos de cultivo, los cultivos de cobertura, el uso de biocarbón y el acolchado, así como la selección de las variedades más apropiadas (Lamaoui y col., 2018; Wang y Ren, 2025). Entre las medidas de largo plazo se encuentran la construcción de reservorios, el mejoramiento de sistemas de alerta temprana y el desarrollo de variedades resistentes (Wang y Ren, 2025). Estas prácticas deben implementarse de manera integrada, considerando las condiciones de cada región productora y las proyecciones climáticas locales, pues su efectividad puede ser específica para cada región, y algunas pueden tener consecuencias no deseadas en la calidad ambiental.

La investigación del frijol en México requiere un enfoque interdisciplinario. Entre las prioridades se incluyen: la identificación de nuevas áreas aptas para su producción, el desarrollo de variedades tolerantes a temperaturas altas mediante selección bajo condiciones de estrés controladas (evaluando características como viabilidad del polen y carga de vainas), la introgresión de los genes *I* y *bc-3*, el monitoreo del clima y de las poblaciones de insectos y virus, así como el desarrollo de tec-

nologías de manejo integrado basadas en modelos predictivos (Skendžić y col., 2021; Jeger y col., 2023; Subedi y col., 2023; Alfizar y Nasution, 2024). Estas estrategias requieren concordancia con la región productora, considerando la interacción entre estrés térmico y problemas fitosanitarios, por lo que probablemente se requerirá de variedades específicas de nicho (del-Canto y col., 2025).

La identificación precisa de vectores y especies virales, junto con la predicción del efecto de temperaturas altas sobre enfermedades y plagas de frijol, son esenciales para adoptar medidas efectivas. La inclusión de herramientas moleculares en el diagnóstico es estratégica; por ejemplo, la secuenciación masiva para la identificación de virus (Anaya-López y col., 2025a), y en el caso de las chicharritas, el código de barras de ADN, que complementa la identificación morfológica tradicional y permite la caracterización precisa de especies en cualquier etapa de su ciclo de vida (Emam y col., 2020). Estas herramientas y el conocimiento generado sentarán bases para desarrollar variedades resistentes, sistemas de alerta temprana y métodos de manejo integrado que eviten pérdidas severas de producción y contribuyan a la sostenibilidad alimenticia.

Actualmente, en México se carece de un sistema centralizado de registro y monitoreo de pérdidas en frijol atribuibles al cambio climático, lo que dificulta cuantificar el impacto económico y social, así como evaluar la efectividad de las estrategias implementadas. Un sistema que integre datos climáticos, fitosanitarios y económicos de las distintas regio-

nes productoras, con la participación coordinada de instituciones de investigación, organizaciones de productores y dependencias gubernamentales, orientará políticas públicas, investigación y transferencia de tecnología que garanticen la seguridad alimentaria de este cultivo básico en México.

CONCLUSIONES

El incremento de la temperatura ambiental, efecto asociado al cambio climático, representa una amenaza emergente para la producción de frijol en México. Las pérdidas confirmadas experimentalmente por el INIFAP, durante el ciclo otoño-invierno 2024, alertan sobre la vulnerabilidad del cultivo a temperaturas extremas. La evidencia científica indica que las altas temperaturas pueden afectar tanto la fisiología reproductiva del cultivo como alterar la dinámica de plagas y enfermedades virales, lo que podría ser consistente con las observaciones de campo que necesitan ser confirmadas. Ante esta situación se requieren estrategias integrales que incluyen: el desarrollo de variedades tolerantes a temperaturas altas portadoras de los genes *I* y *bc-3* de resistencia a BCMV y BCMNV, el monitoreo sistemático de virus y plagas emergentes, la adaptación de tecnologías de manejo integrado, y la identificación de áreas alternativas de producción. Estas medidas son fundamentales para preservar la seguridad alimentaria de México, donde el frijol constituye un pilar de la dieta nacional.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declararon no tener conflictos de intereses de ningún tipo.

REFERENCIAS

- Acosta-Gallegos, J. A., Anaya-López, J. L., Uresti-Gil, J., Chiquito-Almanza, E., Guerrero-Aguilar, B. Z. y Jiménez-Hernández, Y. (2021). Mejoramiento genético del frijol en la región de El Bajío de México. En A. V. Ayala-Garay Garay, J. A. Acosta-Gallegos y L. Reyes-Muro (Eds.). *El cultivo del frijol presente y futuro para México* (pp. 83-97). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional Centro. Campo Experimental Bajío. https://vun.inifap.gob.mx/VUN_MEDIA/BibliotecaWeb/_media/_librotecnico/12319_5085_EL_cultivo_del_frijol_presente_y_futuro_para_M%C3%A9xico.pdf. Fecha de consulta: 5 de septiembre de 2025.
- Acosta-Gallegos, J. A., Jiménez-Hernández, Y., García-Álvarez, N. C., Rojas-Tovar, M., Chiquito-Alman-

- za, E. y Anaya-López, J. L. (2020). 'San Blas': variedad de frijol Negro Opaco resistente a BCMV y BCMNV para Nayarit y El Bajío de Guanajuato. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(7), 1701-1707. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i7.1963>
- Acosta-Gallegos, J. A., Montero-Tavera, V., Jiménez-Hernández, Y., Anaya-López, J. L. y Gonzalez-Chavira, M. M. (2014). 'Dalia', nueva variedad de frijol de grano tipo Flor de Junio para la región centro de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(2), 331-336. <https://doi.org/10.29312/remexca.v5i2.971>
- Acosta-Gallegos, J. A., Sánchez-García, M. B., Ocampo-Hernández, J. y Jiménez-Hernández, Y. (2013). Guía para la producción de frijol. En A. Mandujano-Bueno, R. Paredes-Melesio, M. P. Alamilla-Gómez, y J. F. Buenrostro-Rodríguez (Eds.), *Guía para la producción de Maíz, Frijol, Trigo y Sorgo en Guanajuato* (pp. 82-112). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Alfizar & Nasution, S. S. (2024). The explosion of pests and diseases due to climate change. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1297(1), 012072. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1297/1/012072>
- Amari, K., Huang, C., & Heinlein, M. (2021). Potential impact of global warming on virus propagation in infected plants and agricultural productivity. *Frontiers in Plant Science*, 12, 649768. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.649768>
- Anaya-López, J. L., Chiquito-Almanza, E., Acosta-Gallegos, J. A., Tosquy-Valle, O. H., Montero-Tavera, V., & González-Pérez, E. (2025a). Diagnosis and characterization of plant viruses in Mexico using HTS: an approach to guide virus management and marker assisted selection. *Discover Plants*, 2(1), 246. <https://doi.org/10.1007/s44372-025-00332-y>
- Anaya-López, J. L., Guerrero-Aguilar, B. Z., Jiménez-Hernández, Y., Chiquito-Almanza, E., Prado-García, A. A. y Acosta-Gallegos, J. A. (2025b). 'San Luis 22': variedad de frijol negro brillante de temporal para el centro-norte de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 16(2), e3411. <https://doi.org/10.29312/remexca.v16i2.3411>
- Anaya-López, J. L., Ibarra-Pérez, F. J., Rodríguez-Cota, F. G., Ortega-Murrieta, P. F., Chiquito-Almanza, E. y Acosta-Gallegos, J. A. (2021). Leguminosas de grano en México: variedades mejoradas de frijol y garbanzo desarrolladas por el INIFAP. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(25), 63-75. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i25.2827>
- Anaya-López, J. L., Rojas-Tovar, L. M., Cisneros-López, H. C., & Acosta-Gallegos, J. A. (2022). Seed yield and harvest index of Pinto and Flor de Mayo dry beans germplasm under stress by high temperature. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 45(1), 33-41.
- Appiah-Kubi, D., Asibuo, J. Y., Butare, L., Yeboah, S., Appiah-Kubi, Z., Kena, A. W., Tuffour, H. O., & Akromah, R. (2022). Heat stress tolerance: A prerequisite for the selection of drought-and low phosphorus-tolerant common beans for equatorial tropical regions such as Ghana. *Plants*, 11(18), 2352. <https://doi.org/10.3390/plants11182352>
- Assefa, T., Assibi-Mahama, A., Brown, A. V., Cannon, E. K. S., Rubyogo, J. C., Rao, I. M., Blair, M. W., & Cannon, S. B. (2019). A review of breeding objectives, genomic resources, and marker-assisted methods in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Molecular Breeding*, 39(2), 20. <https://doi.org/10.1007/s11032-018-0920-0>
- Backus, E. A., Serrano, M. S., & Ranger, C. M. (2005). Mechanisms of hopperburn: an overview of insect taxonomy, behavior, and physiology. *Annual Review of Entomology*, 50(1), 125-151. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.49.061802.123310>
- Barrera, S., Berny-Mier y Teran, J. C., Aparicio, J., Díaz, J., Leon, R., Beebe, S., Urrea, C. C., & Gepts, P. (2024). Identification of drought and heat tolerant tepary beans in a multi-environment trial study. *Crop Science*, 64(6), 3399-3416. <https://doi.org/10.1002/csc2.21354>
- Barrios-Gómez, E. J. y López-Castañeda, C. (2009). Temperatura base y tasa de extensión foliar en frijol. *Agrociencia*, 43(1), 29-35.
- Basit, M., Saeed, S., Saleem, M. A., & Zulfiqar, R. (2016). Population dynamics of sunflower insect pests and their natural enemies. *Sarhad Journal of Agriculture*, 32(4), 417-423. | <http://dx.doi.org/10.17582/journal.sja/2016/32.4.417.423>
- Beebe, S., Ramírez-Villegas, J., Álvarez, P., Ricaurte, J., Mora, A., Guerrero, A. F., Rosas, J. C., Rodríguez-Baide, J. M., & van-den-Berg, M. (2017). Modelación del frijol en Latinoamérica: Estado del arte y base de datos para parametrización, EUR. Publications Office of the European Union, Luxembourg. <http://dx.doi.org/10.2760/325955, JRC110112>
- Beebe, S. E., Rao, I. M., Blair, M. W., & Butare, L. (2009). Breeding for abiotic stress tolerance in com-

mon bean: Present and future challenges. *SABRAO Journal of Breeding and Genetics*, 41, 1-10.

Chiquito-Almanza, E., Caballero-Pérez, J., Acosta-Gallegos, J. A., Montero-Tavera, V., Mariscal-Amaro, L. A., & Anaya-López, J. L. (2021). Diversity and distribution of viruses infecting wild and domesticated *Phaseolus* spp. in the Mesoamerican Center of domestication. *Viruses*, 13(6), 1153. <https://doi.org/10.3390/v13061153>

Chiquito-Almanza, E., Caballero-Pérez, J., Guevara-Olvera, L., Acosta-García, G., Pérez-Pérez, M. C. I., Acosta-Gallegos, J. A., & Anaya-López, J. L. (2018). First report of cowpea mild mottle virus infecting cultivated and wild *Phaseolus* in the Central-Western region of Mexico. *Plant Disease*, 102(5), 1047-1047. <https://doi.org/10.1094/PDIS-07-17-0990-PDN>

Chiquito-Almanza, E., Zamora-Aboytes, J. M., Medina, H. R., Acosta-Gallegos, J. A., & Anaya-López, J. L. (2020). Complete genome sequence of a novel comovirus infecting common bean. *Archives of Virology*, 165(6), 1505-1509. <https://doi.org/10.1007/s00705-020-04610-w>

CIAT, Centro Internacional de Agricultura Tropical (2015). *Developing Beans That Can Beat the Heat*; Tech. Report; International Center for Tropical Agriculture: Cali, Colombia. [En línea]. Disponible en: [http://ciat-library.ciat.cgiar.org/articulos_ciat/biblioteca/DEVELOPING_BEANS_THAT_CAN_BEAT_THE_HEAT_lowres%20\(2\).pdf](http://ciat-library.ciat.cgiar.org/articulos_ciat/biblioteca/DEVELOPING_BEANS_THAT_CAN_BEAT_THE_HEAT_lowres%20(2).pdf). Fecha de consulta: 20 de mayo de 2024.

Collmer, C. W., Marston, M. F., Taylor, J. C., & Jahn, M. (2000). The I gene of bean: A dosage-dependent allele conferring extreme resistance, hypersensitive resistance, or spreading vascular necrosis in response to the potyvirus Bean common mosaic virus. *Molecular Plant Microbe Interactions*, 13(11), 1266-1270. <https://doi.org/10.1094/MPMI.2000.13.11.1266>

Del-Canto, A., De-Diego, N., Sanz-Sáez, Á., Štefelo-vá, N., Pérez-López, U., Mena-Petite, A., & Lacuesta, M. (2025). Organic management and local genotypes for elevating yield and seed quality to confront climate change challenges. *European Journal of Agronomy*, 168, 127613. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2025.127613>

Deutsch, C. A., Tewksbur, J. J., Tigchelaar, M., Battisti, D. S., Merrill, S. C., Huey, R. B., & Naylor, R. L. (2018). Increase in crop losses to insect pests in a warming climate, *Science*, 361, 916-919. <https://doi.org/10.1126/science.1257566>

<https://doi.org/10.1126/science.1257566>

Drijfhout, E., Silbernagel, M. J., & Burke, D. W. (1978). Differentiation of strains of bean common mosaic virus. *Netherlands Journal of Plant Pathology*, 84, 13-26. <https://doi.org/10.1007/BF01978099>

Emam, A. K., Ibrahim, H. E., Helmi, A., & Sharaf, A. (2020). Identification of some Egyptian leafhopper species (Hemiptera: Cicadellidae) using DNA barcoding. *Biologia*, 75, 1337-1346. <https://doi.org/10.2478/s11756-019-00384-y>

Espinosa-García, J. A., Acosta-Gallegos, J. A., Vélez-Izquierdo, A. y Jolalpa-Barrera, J. L. (2021). Mercado potencial de semilla de variedades mejoradas de frijol para riego y temporal. En A. V. Ayala-Garay, J. A. Acosta-Gallegos y L. Reyes-Muro (Eds.). *El cultivo del frijol presente y futuro para México* (pp. 145-161). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional Centro. Campo Experimental Bajío. https://vun.inifap.gob.mx/VUN_MEDIA/BibliotecaWeb/_media/_librotecnico/12319_5085_El_cultivo_del_frijol_presente_y_futuro_para_M%C3%A9xico.pdf

Feng, X., Myers, J. R., & Karasev, A. V. (2015). Bean common mosaic virus isolate exhibits a novel pathogenicity profile in common bean, overcoming the *bc-3* resistance allele coding for the mutated eIF4E translation initiation factor. *Phytopathology*, 105(11), 1487-1495. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-04-15-0108-R>

Feng, X., Poplawsky, A. R., & Karasev, A. V. (2014). A recombinant of Bean common mosaic virus induces temperature-insensitive necrosis in an *I* gene-bearing line of common bean. *Phytopathology*, 104(11), 1251-1257. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-02-14-0048-R>

Ferreira, A. L., Ghanim, M., Xu, Y., & Pinheiro, P. V. (2024). Interactions between common bean viruses and their whitefly vector. *Viruses*, 16(10), 1567. <https://doi.org/10.3390/v16101567>

FGP, Fundación Guanajuato Produce (2025). Red de estaciones Agroclimáticas del estado de Guanajuato. [En línea]. Disponible en: <https://www.estaciones.fundacionguanajuato.mx/home.php>. Fecha de consulta: 2 de julio de 2025.

FIRA, Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (2023). Panorama agroalimentario frijol 2023. Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Sectorial. [En línea]. Disponible en: <https://www.fira.gob.mx/publicaciones/panorama-agroalimentario-frijol-2023>

<https://www.fira.gob.mx/InvYEvalEcon/EvaluacionIF>. Fecha de consulta: 5 de febrero de 2024.

Flores-Esteves, N., Acosta-Gallegos, J. A., & Silva-Rosales, L. (2003). Bean common mosaic virus and bean common mosaic necrosis virus in Mexico. *Plant Disease*, 87(1), 21-25. <https://doi.org/10.1094/PDIS.2003.87.1.21>

Garrido-Ramírez, E. R., Sudarshana, M. R., & Gilbertson, R. L. (2000). Bean golden yellow mosaic virus from Chiapas, Mexico: Characterization, pseudorecombination with other bean-infecting geminiviruses and germ plasm screening. *Phytopathology*, 90(11), 1224-1232. <https://doi.org/10.1094/PHYTO.2000.90.11.1224>

Gehlot, L. & Prajapat, A. K. (2021). Seasonal incidence of insect pests on mungbean (*Vigna radiata*) in correlation with meteorological data. *Agricultural Science Digest-A Research Journal*, 41(spl), 199-202. <https://doi.org/10.18805/ag.D-5222>

Gross, Y. & Kigel, J. (1994). Differential sensitivity to high temperature of stages in the reproductive development of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Field Crops Research*, 36(3), 201-212. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(94\)90112-0](https://doi.org/10.1016/0378-4290(94)90112-0)

Gutiérrez-Sánchez, Á., Cobos, A., López-Herranz, M., Canto, T., & Pagán, I. (2023). Environmental conditions modulate plant virus vertical transmission and survival of infected seeds. *Phytopathology*, 113(9), 1773-1787. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-11-202448-V>

Ibarra-Perez, F. J., Tosquy-Valle, O. H., Rodríguez-Rodríguez, J. R., Villar-Sánchez, B., López-Salinas, E. y Anaya-López, J. L. (2022). Rubí: nueva variedad mejorada de frijol negro para las áreas tropicales de Veracruz y Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(3), 577-585. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i3.2227>

IPPC, International Plant Protection Convention (2021). Scientific review of the impact of climate change on plant pests – A global challenge to prevent and mitigate plant pest risks in agriculture, forestry and ecosystems. Rome. FAO on behalf of the IPPC Secretariat. <https://doi.org/10.4060/cb4769en>

Jacinto-Hernández, C., Coria-Peña, M., Contreras-Santos, G., Martínez-López, L., Zapata-Martelo, E. y Ayala-Carrillo, M. R. (2019). Azúcares totales y proteína en frijol nativo de la región Triqui Alta, Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(7), 1667-1674. <https://doi.org/10.29312/remexca.v>

10i7.2114

Jeger, M., Hamelin, F., & Cuniffe, N. (2023). Emerging themes and approaches in plant virus epidemiology. *Phytopathology*, 113(9), 1630-1646. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-10-22-0378-V>

Jiménez-Hernández, Y., Montero-Tavera, V., Anaya-López, J. L., Jiménez-Galindo, J. C., Herrera-Hernández, G., Guerrero-Aguilar, B. Z. y Acosta-Gallegos, J. A. (2018). Salinas: nueva variedad de frijol pinto para áreas de temporal de Guanajuato. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(6), 1295-1301. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i6.1589>

Lamaoui, M., Jemo, M., Datla, R., & Bekkaoui, F. (2018). Heat and drought stresses in crops and approaches for their mitigation. *Frontiers in Chemistry*, 6, 26. <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00026>

Lehmann, P., Ammunet, T., Barton, M., Battisti, A., Eigenbrode, S. D., Jepsen, J. U., Kalinkat, G., Neuvoonen, S., Niemelä, P., Terblanche, J. S., Økland, B., & Björkman, C. (2020). Complex responses of global insect pests to climate warming. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 18(3), 141-150. <https://doi.org/10.1002/fee.2160>

Lone, A. A., Khan, M. N., Gul, A., Dar, Z. A., Iqbal, A. M., Lone, B. A., Ahangar, A., Ur-Rasool, F., Habib-Khan, M., Ali, G., Nisar, F., & Fayaz, A. (2021). Common beans and abiotic stress challenges. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 40(14), 41-53. <http://www.sdiarticle4.com/review-history/69745>

López-Salinas, E., Becerra-Leonor, E. N., Acosta-Gallegos, J. A. y Villar-Sánchez, B. (1993). Variedades de frijol tolerantes al virus del mosaico dorado para el trópico de México. *Agricultura Técnica en México*, 19(2), 99-109.

Martínez-Marrero, N., Avalos-Calleros, J. A., Chiquito-Almanza, E., Acosta-Gallegos, J. A., Ambriz-Granados, S., Anaya-López, J. L., & Argüello-Astorga, G. R. (2020). A new begomovirus isolated from a potyvirus-infected bean plant causes asymptomatic infections in bean and *N. benthamiana*. *Archives of Virology*, 165(7), 1659-1665. <https://doi.org/10.1007/s00705-020-04646-y>

Medina-García, G., Ruiz-Corral, J. A., Rodríguez-Moreno, V. M., Soria-Ruiz, J., Díaz-Padilla, G. y Zarázua-Villaseñor, P. (2016). Efecto del cambio climático en el potencial productivo del frijol en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(SPE13), 2465-2474. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i13.461>

- Morales, F. J. & Anderson, P. K. (2001). The emergence and dissemination of whitefly-transmitted geminiviruses in Latin America. *Archives of Virology*, 146(3), 415-441. <https://doi.org/10.1007/s007050170153>
- Morales, F. J. y Castaño, J. M. (2008). Enfermedades virales del frijol común en América Latina. Publicación No. 364. Centro Internacional de Agricultura tropical (CIAT), Cali, Colombia. [En línea]. Disponible en: http://ciat-library.ciat.cgiar.org/Articulos_Ciat/Digital/SB327.E56_C.3_Enfermedades_Virales_del_Fr%C3%ADjol_Com%C3%BAAn_en_Am%C3%A9rica_Latina.pdf Fecha de consulta: 5 de septiembre de 2025.
- Morales, F. J. & Niessen, I. 1988. Comparative responses of selected *Phaseolus vulgaris* germplasm inoculated artificially and naturally with bean golden mosaic virus. *Plant Disease*, 72(12), 1020-1023.
- Moreno, A. B. & López-Moya, J. J. (2020). When viruses play team sports: Mixed infections in plants. *Phytopathology*, 110(1), 29-48. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-07-19-0250-FI>
- Prado-García, A. A., Acosta-Gallegos, J. A., Montero-Tavera, V., Yáñez-López, R., Ramírez-Pimentel, J. G., & Aguirre-Mancilla, C. L. (2025). Identification of common bean genotypes tolerant to the combined stress of terminal drought and high temperature conditions. *Agronomy*, 15(7), 1624; <https://doi.org/10.3390/agronomy15071624>
- Rainey K. M. & Griffiths P. D. (2005). Differential response of common bean genotypes to high temperature. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 130(1), 18-23. <https://doi.org/10.21273/JASHS.130.1.18>
- Reddy, P. P. (2018). Emerging crop pest problems: redefining management strategies. [En línea]. Disponible en: <https://www.scientificpubonline.com/bookdetail/emerging-crop-pest-problems-redefining-management-strategies/9789386652249/0>. Fecha de consulta: 5 de febrero de 2024.
- Rodríguez-Licea, G., García-Salazar, J. A., Rebollar-Rebollar, S. y Cruz-Contreras, A. C. (2010). Preferencias del consumidor de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en México: factores y características que influyen en la decisión de compra diferenciada por tipo y variedad. *Paradigma Económico*, 2(1), 121-145.
- Rose, T., Lowe, C., Miret, J. A., Walpole, H., Halsey, K., Venter, E., Urban, M. O., Buendía, H. F., Kurup, S., O'Sullivan, D. M., Beebe, S., & Heuer, S. (2023). High temperature tolerance in a novel, high-quality *Phaseolus vulgaris* breeding line is due to maintenance of pollen viability and successful germination on the stigma. *Plants*, 12(13), 2491. <https://doi.org/10.3390/plants12132491>
- Sánchez-Castro, A., Miranda-Cabrera, I., Quiñones-Pantoja, M. L., Piñol, B. E. y Fernández-Argudín, B. M. (2016). Saltahojas (*Typhlocybae*) y su relación con los síntomas de enfermedades en un campo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). *Revista de Protección Vegetal*, 31(3), 153-158.
- Sastry, K. S. (2013). Mechanism of seed transmission. In K. S. Sastry (Ed.), *Seed-borne plant virus diseases* (pp. 327). Springer Science & Business Media.
- Sharma, M., Sharma, A., & Gupta, S. K. (2020). Climate change and plant diseases. *Agricultural Research Journal*, 57(1), 1-6. <https://doi.org/10.5958/2395-146X.2020.00021.6>
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2025a). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. [En línea]. Disponible en: https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/. Fecha de consulta: 2 de julio de 2025.
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2025b). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. [En línea]. Disponible en: https://nube.agricultura.gob.mx/avance_agricola/. Fecha de consulta: 2 de julio de 2025.
- Singhal, P., Nabi, S. U., Yadav, M. K., & Dubey, A. (2021). Mixed infection of plant viruses: Diagnostics, interactions and impact on host. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 128(2), 353-368. <https://doi.org/10.1007/s41348-020-00384-0>
- Skendžić, S., Zovko, M., Živković, I. P., Lešić, V., & Lemić, D. (2021). The impact of climate change on agricultural insect pests. *Insects*, 12(5), 440. <https://doi.org/10.3390/insects12050440>
- SMN-CONAGUA, Servicio Meteorológico Nacional / Comisión Nacional del Agua. (2024). Reporte del Clima en México. Mayo 2024. [En línea]. Disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/RC-Mayo24.pdf>. Fecha de consulta: 3 de febrero de 2024.
- Soler-Garzón, A., McClean, P. E., & Miklas, P. N. (2021a). Genome-wide association mapping of *bc-1* and *bc-u* reveals candidate genes and new adjustments to the host-pathogen interaction for resis-

tance to bean common mosaic necrosis virus in common bean. *Frontiers in Plant Science*, 12, 699569. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.699569>

Soler-Garzón, A., McClean, P. E., & Miklas, P. N. (2021b). Coding mutations in vacuolar protein-sorting 4 AAA+ ATPase endosomal sorting complexes required for transport protein homologs underlie *bc-2* and new *bc-4* gene conferring resistance to bean common mosaic virus in common bean. *Frontiers in Plant Science*, 12, 769247. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.769247>

Suárez, J. C., Polanía, J. A., Contreras, A. T., Rodríguez, L., Machado, L., Ordoñez, C., Beebe, S., & Rao, I. M. (2020). Adaptation of common bean lines to high temperature conditions: genotypic differences in phenological and agronomic performance. *Euphytica*, 216(2), 28. <https://doi.org/10.1007/s10681-020-2565-4>

Subedi, B., Poudel, A., & Aryal, S. (2023). The impact of climate change on insect pest biology and ecology: Implications for pest management strategies, crop production, and food security. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14, 100733. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100733>

Tene, T. M., Sari, H., Canci, H., Maaruf, A., Eker, T., & Toker, C. (2023). Traits related to heat stress in *Phaseolus* species. *Agriculture*, 13(5), Article 953. <https://doi.org/10.3390/agriculture13050953>

Tosquy-Valle, O. H., Ibarra-Pérez, F. J., Acosta-Gallegos, J. A., Esqueda-Esquivel, V. A. y Anaya-López, J. L. (2025). Rincón Grande: variedad de frijol negro para Veracruz y Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 16(3), e3646. <https://doi.org/10.29312/remexca.v16i3.3646>

Trebicki, P. (2020). Climate change and plant virus epidemiology. *Virus Research*, 286, 198059. <https://doi.org/10.1016/j.virusres.2020.198059>

Tsai, W. A., Brosnan, C. A., Mitter, N., & Dietzgen, R. G. (2022). Perspectives on plant virus diseases in a climate change scenario of elevated temperatures. *Stress Biology*, 2(1), 37. <https://doi.org/10.1007/s44154-022-00058-x>

Vargas, Y., Mayor-Duran, V. M., Buendia, H. F., Ruiz-Guzman, H., & Raatz, B. (2021). Physiological and genetic characterization of heat stress effects in a common bean RIL population. *PLoS One*, 16(4), Article e0249859. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249859>

Verhoeven, A., Kloth, K. J., Kupczok, A., Oymans,

G. H., Damen, J., Rijnsburger, K., Jiang, Z., Deelen, C., Sasidharan, R., van-Zanten, M., & van-der-Vlugt, R. A. A. (2023). Arabidopsis latent virus 1, a comovirus widely spread in *Arabidopsis thaliana* collections. *New Phytologist*, 237, 1146-1153. <https://doi.org/10.1111/nph.18466>

Wang, L. & Ren, W. (2025). Drought in agriculture and climate-smart mitigation strategies. *Cell Reports Sustainability*, 2(6), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.crsus.2025.100386>

Weaver, M. L., Timm, H., Silbernagel, M. J., & Burke, D. W. (1985). Pollen staining and high-temperature tolerance of bean. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 110(6), 797-799. <https://doi.org/10.21273/JASHS.110.6.797>

WMO, World Meteorological Organization (2024). Global Annual to Decadal Climate Update Target years: 2024 and 2024-2028. [En línea]. Disponible en: <https://library.wmo.int/records/item/68910wmo-global-annual-to-decadal-climate-update>. Fecha de consulta: 3 de febrero de 2024.



Fertilización foliar del frijol con boro y magnesio contra el estrés por altas temperaturas naturales

Foliar fertilization of beans with boron and magnesium to prevent high temperature stress

Alejandro Antonio Prado-García^{1,2}, Gabriel Iturriaga de-la-Fuente², César Leobardo Aguirre-Mancilla², Jorge Alberto Acosta-Gallegos^{1*}

RESUMEN

El estrés por alta temperatura disminuye el rendimiento y calidad del frijol. El objetivo del presente trabajo fue determinar el rendimiento de cuatro variedades de frijol, dos de *Phaseolus vulgaris* (Granada y Rarámuri) y dos de *Phaseolus acutifolius* (TARS-Tep 23 y Alubia Choix) producidas bajo riego, con la aplicación de boro (B) y magnesio (Mg) en condiciones de campo con temperaturas naturales altas. Se administraron en tres ocasiones (una en pre-floración y dos durante la floración) cuatro tratamientos de fertilización foliar: B, Mg, B + Mg y un testigo sin fertilizar. El ensayo se realizó en marzo de 2020 y 2021. Se cuantificó la biomasa, peso de 100 semillas, rendimiento e índice de cosecha. Se determinó la germinación y vigor de la semilla cosechada en cada tratamiento y variedad. En promedio, *P. vulgaris* resultó superior ($P \leq 0.05$) a *P. acutifolius* en peso de 100 semillas y rendimiento. La variedad Rarámuri mostró un mayor rendimiento, biomasa y peso de 100 semillas. Los tratamientos de fertilización superaron al testigo, con incremento promedio de 0.4 g en peso de 100 semillas y 512 kg/ha en rendimiento. La aplicación foliar de Mg aumentó el rendimiento y el peso de 100 semillas en ambas especies y variedades evaluadas.

PALABRAS CLAVE: *Phaseolus vulgaris* L., *Phaseolus acutifolius* A. Gray, estrés abiótico, micronutrientes, rendimiento.

ABSTRACT

High temperature stress lowers bean yield and quality. This work aimed to determine the yield response of four bean cultivars, two of *P. vulgaris* (Granada and Rarámuri) and two of *P. acutifolius* (TARS-Tep 23 and Alubia Choix) grown under irrigation, to the application of Boron and Magnesium under field conditions with naturally high temperatures. Four foliar fertilization treatments were administered on three occasions (one in pre- and two during flowering) B, Mg, B + Mg and a control group without fertilization. The trial was carried out in 2020 and 2021. Aerial biomass, weight of 100 seeds, yield and the harvest index were quantified. Germination and vigor of harvested seeds were determined for each treatment and cultivar. On average, *P. vulgaris* was superior ($P \leq 0.05$) to *P. acutifolius* in 100-seed weight and seed yield. The Rarámuri cultivar showed greater yield, biomass, and 100-seed weight. The foliar fertilization treatments surpassed the control group, with an average increase of 0.4 g in 100-seed weight and 512 kg/ha in yield. Foliar Mg application increased yield and 100-seed weight in both species and varieties evaluated.

KEYWORDS: *Phaseolus vulgaris* L., *Phaseolus acutifolius* A. Gray, abiotic stress, micronutrients, yield.

*Correspondencia: acosta.jorge@inifap.gob.mx/Fecha de recepción: 10 de abril de 2025/Fecha de aceptación: 17 de octubre de 2025/Fecha de publicación: 31 de octubre de 2025.

¹Centro Nacional de Investigación disciplinaria (CIR Centro), Campo Experimental Bajío, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales (INIFAP) Agrícolas y Pecuarias, km. 6.5 carretera Celaya-San Miguel de Allende, Celaya, Guanajuato, México, C. P. 38110. ²Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Roque (TecNM-IT Roque), Celaya, Guanajuato, México, C. P. 38110.

INTRODUCCIÓN

El frijol se cataloga como un cultivar extremadamente sensible al estrés por calor, principalmente cuando este ocurre durante la etapa reproductiva inicial (Porch y Jahn, 2001). El efecto simultáneo de altas temperaturas y déficit de humedad provocan el aborto de flores y vainas pequeñas, lo que afecta directamente el rendimiento (Porch y Jahn, 2001; Omae y col., 2012). A nivel global, se estima que el cambio climático incrementará la presencia de sequía y de altas temperaturas, lo que podría dañar del 60 % al 73 % del área actual de siembra del frijol, ocasionando pérdidas en la producción del 10 % al 100 % (Beebe y col., 2008).

En El Bajío, el frijol se produce en dos modalidades de siembra, riego y temporal, siendo más importantes las primeras, por su alta productividad. Sin embargo, la superficie bajo riego destinada al cultivo de frijol ha disminuido en los últimos años, debido a un bajo rendimiento, que podría asociarse a la presencia de temperaturas superiores a 32 °C, que coinciden con el inicio de la etapa reproductiva (Anaya-López y col., 2022). Dichas temperaturas dañan el polen y causan la caída de vainas y un menor número de semillas en estas (Porch y Jahn, 2001). Anaya-López y col. (2022) determinaron, a campo abierto, el efecto de la temperatura alta sobre el rendimiento e índice de cosecha (IC) en germoplasma mejorado de frijol de los tipos Pinto y Flor de Mayo. En su estudio, los materiales con bajo IC registraron producción alta de biomasa y un elevado número de vainas, pero con una o dos semillas, por lo que generaron un rendimiento inferior. Por el contrario, los materiales con rendimiento alto mostraron un número elevado de granos por unidad de área, como resultado de la formación de más vainas con mayor número de semillas. Omae y col. (2012) obtuvieron resultados similares y concluyeron que los materiales de frijol tolerantes al calor mostraron alta capacidad para distribuir fotoasimilados a las ramas, lo que se tradujo en alta producción de vainas y semillas.

Cakmak y Yazici (2010) señalaron que, la clorosis en las hojas ocurre bajo condiciones de estrés abiótico en combinación con una deficiencia nutrimental de potasio (K) y Mg. Indicaron que las plantas con deficiencia de Mg fueron más susceptibles al estrés por altas temperaturas, aumentando la clorosis, ya que este elemento constituye 2.7 % de la clorofila y es fundamental en la fotosíntesis, además, promueve el crecimiento radicular y el transporte de fotoasimilados en la planta. Adicionalmente, el Mg actúa como cofactor en más de 300 reacciones enzimáticas críticas bajo estrés térmico, incluyendo la síntesis de adenosín trifosfato (ATP) y la activación de la ribulosa-1,5-bifosfato carboxilasa/oxigenasa (RuBisCO), enzimas todas, que se ven severamente comprometidas por las altas temperaturas (Baloch y col., 2022). El boro (B) es otro elemento involucrado en múltiples funciones como la síntesis y estructura de la pared celular, lignificación, metabolismo y transporte de carbohidratos e integridad de la membrana plasmática, entre otros procesos que se ven afectados por las altas temperaturas (Kirkby y Rómheld, 2008). Se estima que cerca del 90 % del B de la planta se encuentra en las paredes celulares, por lo cual puede considerarse como un elemento fundamental para contrarrestar los efectos provocados por las altas temperaturas (Ahmad y col., 2009). La deficiencia de dicho elemento afecta la formación del tubo polínico y con ello la formación del fruto, lo que conlleva a bajos rendimientos. Además, el B es fundamental para la germinación del polen y el crecimiento del tubo polínico, procesos extremadamente sensibles a las altas temperaturas y que pueden determinar el éxito reproductivo del cultivo bajo estrés térmico (Behera y col., 2023). Este problema se puede abordar con el uso de variedades tolerantes a altas temperaturas, en combinación con la nutrición vegetal adecuada (Anaya-López y col., 2022). Por otra parte, entre las especies domesticadas del género *Phaseolus*, el frijol Tepari o escomite es mencionado en la literatura como tolerante a altas temperaturas (Rainey y Griffiths, 2005).

El objetivo de este estudio fue determinar el rendimiento y la calidad fisiológica de la semilla de cuatro variedades de frijol, dos de *P. vulgaris* y dos de *P. acutifolius*, en respuesta a la aplicación foliar de B y Mg, en condiciones de altas temperaturas naturales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio

El estudio se realizó bajo condiciones de campo abierto en el Campo Experimental Bajío (CEBAJ) del (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias) (INIFAP), localizado a los 20°34' 47" N, 100°49'22" W y 1 764 msnm. El clima predominante de la zona es BS1hw (W). La temperatura promedio oscila en los 20.6 °C y la precipitación anual promedio es de 597 mm (Mora y col., 2001).

Material vegetal

Se utilizaron cuatro variedades de frijol de dos especies: *P. vulgaris* L. o frijol común, variedades locales de Granada y Rarámuri, y *P. acutifolius* o frijol Tepari, variedades TARS-Tep 23 (Puerto Rico) y Alubia Choix, Sinaloa.

Diseño experimental

Estudio agronómico

Para las evaluaciones de campo se utilizó un diseño de bloques completos al azar con arreglo de parcelas divididas y tres repeticiones en cada ciclo de cultivo. Este diseño se empleó para controlar el error experimental inherente a las condiciones heterogéneas de campo. La parcela grande estuvo constituida por las cuatro variedades y la subparcela por los cuatro tratamientos de fertilización foliar. Los tratamientos de fertilización fueron YaraVita Boro® al 11 %, 0.5 L/ha (por unidad experimental se aplicaron 0.57 mL/1 L de agua); Yara Vita Magnesio® al 20 %, 4.0 L/ha (por unidad experimental se administraron 4.56 mL/1 L de agua); B + Mg (por unidad experimental se aplicaron 0.57 mL de B + 4.56 mL de Mg/1 L de agua) y un testigo sin fertilizante.

Aplicación de tratamientos foliares

Los tratamientos de fertilización foliar se administraron en tres ocasiones durante el ciclo

de cultivo: la primera se realizó en la etapa de prefloración (aproximadamente a los 35 DDS después de la siembra, DDS), y las dos aplicaciones restantes durante la floración (a los 45 DDS y 55 DDS, aproximadamente). Los tratamientos se llevaron a cabo mediante aspersión foliar, con bomba de mochila (Urrea, FUMU20, El Salto, Jalisco, México), aplicando un volumen de 300 L/ha en las primeras horas de la mañana (7: 00 h a 9: 00 h), para minimizar la evaporación y maximizar la absorción foliar. Se utilizó agua como vehículo y se añadió surfactante no iónico (0.1 % v/v) para mejorar la adherencia y penetración de los micronutrientes en las hojas.

Manejo agronómico

La siembra se realizó a tierra venida, después de un riego de preparación, con una lámina de 30 mm. Las fechas de siembra fueron el 16 de marzo de 2020 y 13 de marzo de 2021. El manejo agronómico fue el mismo en ambos ciclos. El suelo se fertilizó con la dosis 80-60-40 de N-P-K. Se establecieron 12 plantas/m/L en surcos a 76 cm de distancia, lo que representa una densidad de población de aproximadamente 157 895 plantas/ha. La parcela de cada unidad experimental estuvo constituida por 3 surcos de 5 m de longitud. Durante la etapa vegetativa se dieron 2 cultivos mecánicos para controlar maleza. Se llevó a cabo un segundo riego rodado con una lámina de 30 mm a los 30 d después de la siembra (DDS). A los 65 DDS se colocó cintilla para riego por goteo con un gasto de 1 L/h. A partir de ese momento se realizaron 3 riegos semanales, aplicando en cada ocasión una lámina de 15 mm desde los 65 DDS hasta los 95 DDS (195 mm). La lámina total de riego suministrada durante el ciclo de cultivo fue de aproximadamente 255 mm.

Variables evaluadas

Las variables se evaluaron en parcelas útiles (a las cuales se eliminó el efecto de borde para asegurar que todas las plantas tuvieron competencia uniforme con sus vecinas) de un surco central de 5 m/L. Los días a floración se registraron cuando el 50 % de las

plantas presentó al menos una flor abierta. La altura de planta se midió desde la base del tallo hasta el ápice en 5 plantas tomadas al azar dentro de la parcela útil. El número de vainas por planta y el número de semillas por vaina se determinaron a partir de 5 plantas individuales tomadas al azar dentro de la parcela útil.

El rendimiento de semilla (kg/ha) se obtuvo cosechando la parcela útil completa y ajustando la humedad al 14 % mediante la fórmula:

$$\text{Rendimiento ajustado} = [\text{Peso húmedo} \times (100 - \text{humedad inicial})] \div (100 - 14)$$

El peso de 100 semillas (g) se determinó contando y pesando 100 semillas tomadas al azar de cada parcela.

Índice de cosecha (IC)

Se obtuvo un IC modificado, mediante la recolección del material biológico presente en 0.5 m/L antes de la senescencia de las hojas, procurando recolectar en bolsas todas las hojas caídas previo al muestreo. En el cálculo de biomasa aérea se incluyó el peso de tallos, vainas (sin semillas) y hojas. En el caso de las semillas se incluyó solo el peso de las semillas presentes en la muestra recolectada, sin las vainas. El IC se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{IC} = [(\text{Peso de semilla} / \text{Peso de biomasa aérea total}) \times 100]$$

Durante los dos ciclos del cultivo de frijol de riego, se registró la temperatura y precipitación pluvial cada tercer día, en una estación meteorológica automática (Vantage Pro2, Davis Instruments, Hayward, CA, EE. UU.), ubicada a 300 m del sitio experimental.

Caracterización de las semillas

Las semillas obtenidas de cada tratamiento de campo fueron evaluadas en el laboratorio para determinar las variables de calidad fisiológica del porcentaje de germinación estándar a

los 8 d, emergencia de radícula a los 4 d (vigor), peso fresco y seco de plántula, y número de semillas muertas y anormales. Las pruebas se realizaron bajo condiciones controladas de temperatura ($25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$) y humedad relativa ($65\text{ \%} \pm 5\text{ \%}$) utilizando 50 semillas por tratamiento con cuatro repeticiones.

Análisis estadístico

El análisis estadístico de cada ciclo individual se realizó mediante un diseño de bloques completos al azar con arreglo de parcelas divididas, donde la parcela principal correspondió a las variedades y la subparcela a los tratamientos de fertilización foliar, incluyendo sus interacciones. En el análisis combinado de ambos ciclos (2020 y 2021) se empleó un diseño factorial generalizado con los factores año, variedad, fertilización foliar y sus interacciones.

Adicionalmente, se llevaron a cabo análisis multivariados (Componentes Principales y Cluster Jerárquico Aglomerativo) utilizando los promedios de los tres factores principales. Todos los análisis estadísticos se realizaron mediante el paquete estadístico SAS v9.4 (SAS Institute Inc., Cary, NC, EUA) y Genotype-Environment Analysis in R (GEA-R) v4.1 (Desarrollador: Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) (Texcoco, México); los análisis multivariados complementarios, gráficos y cálculos se elaboraron en Microsoft Excel 2016 versión 16.0 (Microsoft Office, Redmond, WA, EUA).

Análisis de correlación

Las variables agronómicas se evaluaron independientemente del tratamiento de fertilización aplicado. Para la interpretación de las correlaciones se utilizó la escala de Cohen (1988): débil ($r = 0.10$ a 0.29), moderada ($r = 0.30$ a 0.49), fuerte ($r = 0.50$ a 0.70) y muy fuerte ($r > 0.70$).

Análisis de semilla por efecto de genotipo y tratamiento de fertilización foliar

Para las evaluaciones de germinación y vigor de la semilla, se utilizó un diseño completamente al azar con arreglo factorial, ya que

las condiciones controladas de laboratorio no requieren bloqueo para el control del error experimental. Los factores del arreglo factorial fueron las cuatro variedades (genotipos) y los cuatro tratamientos de fertilización foliar aplicados por triplicado durante la producción de la semilla en campo.

Se utilizaron semillas provenientes de plantas del ensayo de campo donde se evaluaron los cuatro genotipos bajo diferentes tratamientos de fertilización foliar (B, Mg, B + Mg y testigo), para analizarlas por efecto de genotipo y tratamiento de fertilización foliar.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Temperaturas máximas y mínimas en el ciclo

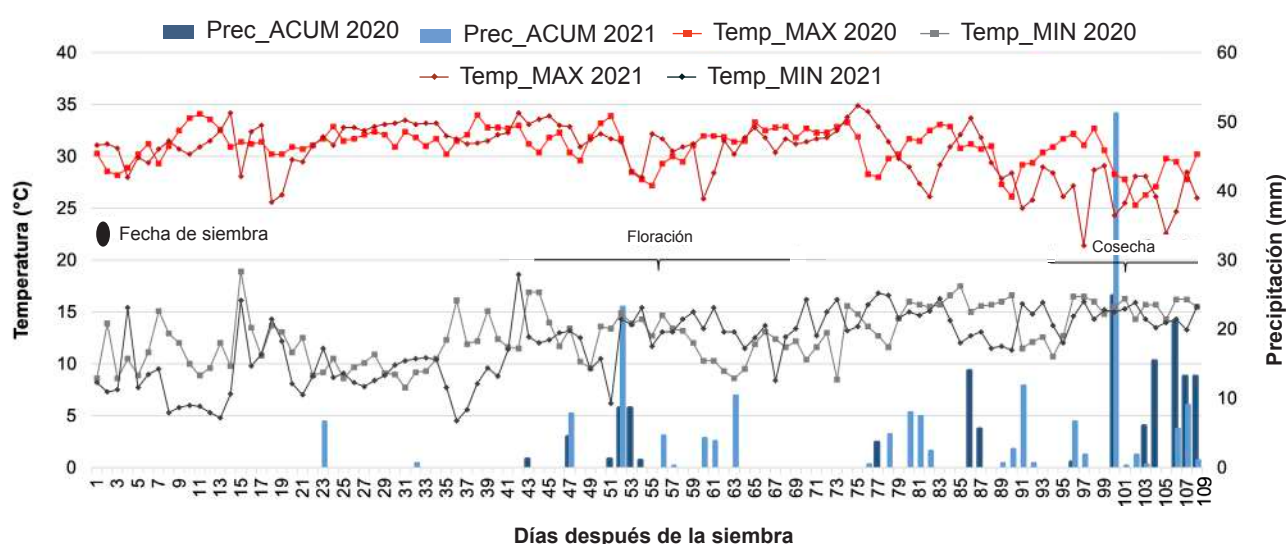
Las temperaturas máximas reportadas en la zona de cultivo (Figura 1; Tabla 1), durante la etapa crítica de floración (21 d) de ambos ciclos (2020 y 2021), oscilaron entre 21.4 °C y 34.9 °C, mientras que las mínimas variaron entre ≈ 4.5 °C y ≈ 18.9 °C. Se registraron 17 d de temperaturas máximas consistentemente ≥ 30 °C en los 2 años. Aunque no se calculó la duración en horas de estas tem-

peraturas elevadas, estuvieron constantemente presentes, toda vez que en 2020, se registraron hasta 7 d consecutivos de temperatura ≥ 30 °C; mientras que en 2021, se reportaron hasta 5 d consecutivos con estas mismas condiciones climáticas, la cuales fueron críticas para los cultivos. La exposición a temperaturas entre 28 °C y 32 °C durante la etapa reproductiva disminuye el número de vainas y semillas, afectando el tamaño de estas últimas, ya que la temperatura es uno de los parámetros ambientales con mayor influencia en el desarrollo del frijol durante todo su ciclo de cultivo (Barrios-Gómez y López-Castañeda, 2009).

Efecto del año

Durante el periodo de siembra 2020, el 76.1 % de los 108 DDS presentaron temperaturas ≥ 30 °C, en tanto que, durante el periodo 2021, el 64.8 % de los DDS registraron ese comportamiento (Figura 1; Tabla 1).

En 2020, la etapa vegetativa tuvo mayor duración (48 d a floración) que en 2021 (44 d a floración) (Tabla 1). Esto pudo haber sido in-



■ Figura 1. Temperaturas máximas y mínimas y precipitación pluvial durante el ciclo del cultivo de frijol de riego en el Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato, en los años 2020 y 2021.

Figure 1. Maximum and minimum temperatures and rainfall during the irrigated bean crop cycle at Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato in 2020 and 2021.

■ Tabla 1. Valores promedio de temperatura y humedad en ambos ciclos de cultivo.

Table 1. Average values of temperature and moisture in both crop cycles.

Periodo	2020			2021		
	Días (n)	Temperatura Máxima (°C)	Precipitación (mm)	Días (n)	Temperatura Máxima (°C)	Precipitación (mm)
Promedio del periodo considerado						
Días a floración	48	31.4 ± 1.3 ^a	5.6	44	30.8 ± 2.4 ^a	7.2
Días de floración	21	31.4 ± 1.8 ^a	19.4	21	31.4 ± 2.1 ^a	54.2
Días a cosecha	40	30.1 ± 2.1 ^a	117.8	43	27.8 ± 2.8 ^b	116.2
Días totales	109	31.0 ± 1.8 ^a	142.8	108	29.8 ± 2.9 ^a	177.6
Promedio de los días con temperaturas ≥ 30 °C en el periodo considerado						
Días a floración	43/48 (89.5 %)	---	---	36/44 (71.4 %)	---	---
Días de floración	15/21 (81.0 %)	---	---	17/21 (81.0 %)	---	---
Días a cosecha	25/40 (62.5 %)	---	---	17/43 (39.5 %)	---	---
Días totales	83/109 (76.1 %)	---	---	70/108 (64.8 %)	---	---

^{a, b} Letras distintas indican diferencia significativa ($P < 0.05$) para un mismo parámetro en diferente año.

fluenciado por las temperaturas mínimas que se presentaron en 2020 (7.7 °C a 18.9 °C) respecto a las de 2021 (4.5 °C a 18.6 °C), aunado a la menor precipitación (5.6 mm vs 15.0 mm) así como a la ausencia de precipitaciones significativas durante el establecimiento del cultivo (Figura 1).

La altura de planta no varió por efecto del ciclo de siembra, pero la biomasa fue significativamente mayor ($P \leq 0.05$) en 2020 (Tabla 2). Dicha acumulación de biomasa podría deberse a que, las condiciones climáticas iniciales de 2020 (89.5 % de temperaturas ≥ 30) (Tabla 1) pudieron haber permitido un desarrollo radicular más profundo y robusto, usualmente asociado con mayor producción vegetativa (Tapia y col., 2022) y explicaría el mayor número de vainas por planta ($P \leq 0.05$) (Tabla 2). Esta característica en particular estuvo asociada al rendimiento superior obtenido en 2020, y con ello, el mayor IC (ambos

con $P \leq 0.05$ respecto al 2021), ya que el número de semillas por vaina y el peso de 100 semillas no mostraron diferencia.

Efecto por variedad

El peso de 100 semillas reportó diferencia ($P \leq 0.05$) entre los cuatro tratamientos. En *P. acutifolius* varió de 11.6 g a 13.0 g, en tanto que *P. vulgaris* registró entre 26.1 g y 32.8 g (Tabla 3). Se ha reportado que las plantas y semillas de *P. acutifolius* son intrínsecamente de menor tamaño y peso en comparación con las de *P. vulgaris*, pero también que estas variedades presentan mayor tolerancia a estrés hídrico y térmico (Rainey y Griffiths, 2005). Si bien, la comparación entre especies diferentes tiene limitaciones, es importante su análisis para evaluar alternativas de cultivo, bajo las condiciones locales del estudio. Asociado a esta diferencia genotípica, el potencial de rendimiento entre ambas especies fue diferente ($P \leq 0.05$), resultando *P. vulgaris*

■ **Tabla 2. Características agronómicas promedio de los cuatro genotipos de frijol en cada uno de los ciclos de cultivo de riego (2020 y 2021).**

Table 2. Average agronomic characteristics of the four bean genotypes during each of the irrigated growing seasons (2020 and 2021).

Parámetro	2020	2021
Días a floración	48.1 ± 3.2 ^a	43.7 ± 2.2 ^b
Altura de planta (cm)	24.9 ± 4.6 ^a	25.4 ± 4.2 ^a
Número de vainas por planta	34.3 ± 4.1 ^a	21.6 ± 4.3 ^b
Número de semillas por vaina	5.3 ± 0.6 ^a	5.0 ± 0.7 ^a
Biomasa (kg/ha)	6 313.9 ± 1 089.5 ^a	4 055.6 ± 1 076.8 ^b
Peso de 100 semillas (g)	20.8 ± 9.5 ^a	21.0 ± 9.1 ^a
Rendimiento de grano (kg/ha)	2 569.9 ± 441.2 ^a	1 101.3 ± 617.4 ^b
Índice de cosecha (%)	43.5 ± 9.8 ^a	27.2 ± 16.1 ^b

Se muestran valores promedio ± desviación estándar de tres tratamientos de fertilización foliar y un testigo sin fertilizar.

^{a,b}Letras distintas indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$) entre años (columnas) para un mismo parámetro evaluado (hileras).

■ **Tabla 3. Características agronómicas promedio de ambos ciclos de cultivo de riego (2020 y 2021) para cada genotipo de frijol.**

Table 3. Average agronomic characteristics across both irrigated growing seasons (2020 and 2021) for each bean genotype.

Parámetro	<i>P. acutifolius</i>		<i>P. vulgaris</i>	
	Alubia Choix	TARS-Tep 23	Granada	Rarámuri
Días a floración	42.1 ± 2.8 ^b	46.7 ± 2.9 ^{ab}	46.7 ± 4.0 ^{ab}	48.3 ± 2.9 ^a
Altura de planta (cm)	21.0 ± 1.9 ^c	21.4 ± 0.7 ^c	26.4 ± 1.4 ^b	31.9 ± 1.0 ^a
Número de vainas por planta	23.5 ± 9.5 ^b	27.7 ± 8.7 ^a	29.9 ± 5.8 ^a	30.5 ± 6.4 ^a
Número de semillas por vaina	4.8 ± 0.7 ^a	4.9 ± 0.9 ^a	5.4 ± 0.4 ^a	5.5 ± 0.6 ^a
Biomasa (kg/ha)	4 591.2 ± 1 809.1 ^b	5 835.1 ± 1 616.2 ^a	4 463.2 ± 1 992.8 ^b	5 849.5 ± 1 481.3 ^a
Peso de 100 semillas (g)	11.6 ± 0.7 ^d	13.0 ± 0.5 ^c	26.1 ± 0.7 ^b	32.8 ± 0.8 ^a
Rendimiento de grano (kg/ha)	1 657.7 ± 986.8 ^b	1 504.7 ± 841.2 ^b	1 972.8 ± 734.1 ^{ab}	2 207.5 ± 659.9 ^a
Índice de cosecha (%)	36.1 ± 17.8 ^c	25.8 ± 10.2 ^d	42.2 ± 13.2 ^a	37.7 ± 12.4 ^b

Se muestran valores promedio ± desviación estándar de tres tratamientos de fertilización foliar y un testigo sin fertilizar, de cada genotipo de ambos ciclos de cultivo. ^{a,b}Letras distintas indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$) entre genotipos (columnas) para un mismo parámetro evaluado (hileras).

superior a *P. acutifolius* (Tabla 3). Las variedades de *P. vulgaris* (Granada y Rarámuri) registraron rendimientos entre 1 972.8 kg/ha y 2 207.5 kg/ha, mientras que los Teparies (TARS-Tep 23 y Alubia Choix) reportaron rendimientos entre 1 504.7 kg/ha y 1 657.7 kg/ha,

representando aproximadamente 65 % a 75 % del rendimiento del frijol común. Estas diferencias son congruentes con reportes previos que indican menor potencial productivo pero mayor tolerancia al estrés en *P. acutifolius* (Rainey y Griffiths, 2005), el cual mantuvo un

rendimiento relativamente estable (diferencia de solo 153 kg/ha entre variedades) comparado con la mayor variabilidad en *P. vulgaris* (diferencia de 235 kg/ha entre variedades), lo que podría indicar mayor consistencia bajo estrés térmico (Tabla 3).

Entre los Teparies, Alubia Choix presentó mayor IC (36.1 % vs 25.8 %) ($P \leq 0.05$) que TARS-Tep 23 (Tabla 3), característica probablemente asociada a una mejor resistencia al estrés térmico tardío. Entre las variedades de *P. vulgaris*, Rarámuri mostró superioridad ($P \leq 0.05$) en altura de planta (31.9 cm vs 26.4 cm), biomasa (5 849 kg/ha vs 4 463 kg/ha) y peso de 100 semillas (32.8 g vs 26.1 g), respecto a la variedad Granada, pero un menor IC (37.7 % vs 42.2 %) ($P \leq 0.05$) (Tabla 3). Ello se explica por la diferencia en el peso de las semillas entre ambas variedades (un 20.4 % más de peso por semilla), lo que implica que Rarámuri requiere mayor inversión de fotoasimilados por semilla individual, resultando en un menor IC a pesar de su superior rendimiento total. Adicionalmente, Rarámuri presentó el mayor número de vainas por planta (30.5) y semillas por vaina (5.5), característi-

cas directamente relacionadas con su superior rendimiento, aunado a que dicha variedad de material de tipo pinto con alto potencial de rendimiento y respuesta neutral al fotoperiodo (Anaya-López col., 2022), está bien adaptado a la localidad de prueba, donde se desarrolló.

Los resultados obtenidos señalan las diferencias en las características fisiológicas y morfológicas de las plantas que son conducentes a la obtención de altos rendimientos entre el frijol Tepari y el frijol común bajo condiciones de estrés ambiental.

Tratamiento de nutrición foliar (B y Mg)

Los tratamientos con fertilización foliar, aplicando micronutrientes superaron al testigo, con un incremento promedio de 0.4 g en peso de 100 semillas y de 512 kg/ha en rendimiento (Tabla 4).

El incremento de rendimiento varió de 40.3 %, 34.7 % y 30.8 % para Mg, B y B + Mg, respectivamente. La aplicación de fertilización foliar mejoró consistentemente el IC en todos los genotipos, siendo este el parámetro más sensi-

■ **Tabla 4. Efecto de los tratamientos de fertilización en las características agronómicas globales de los cuatro genotipos de frijol.**

Table 4. Effect of fertilization treatments on the overall agronomic characteristics of the four bean genotypes.

Parámetro	Testigo	B	Mg	B + Mg
Días a floración	45.4 ± 3.9 ^a	46.5 ± 4.1 ^a	46.1 ± 4.1 ^a	45.9 ± 3.7 ^a
Altura de planta (cm)	24.9 ± 4.9 ^a	25.2 ± 4.3 ^a	25.4 ± 4.2 ^a	25.3 ± 4.5 ^a
Número de vainas por planta	26.2 ± 10.2 ^{ab}	28.4 ± 8.9 ^a	28.9 ± 8.6 ^a	28.2 ± 8.1 ^a
Número de semillas por vaina	5.0 ± 0.7 ^a	5.1 ± 0.7 ^a	5.3 ± 0.6 ^a	5.3 ± 0.7 ^a
Biomasa (kg/ha)	5 537.5 ± 1 572.1 ^a	5 105.3 ± 1 753.9 ^b	5 442.3 ± 1 663.4 ^a	4 654.5 ± 1 537.6 ^c
Peso de 100 semillas (g)	20.6 ± 10.5 ^b	21.0 ± 10.6 ^{ab}	21.1 ± 10.5 ^a	20.9 ± 10.4 ^{ab}
Rendimiento de grano (kg/ha)	1 451.5 ± 873.8 ^b	1 955.50 ± 967.1 ^a	2 037.0 ± 1 017.2 ^a	1 899.0 ± 762.5 ^a
Índice de cosecha (%)	26.4 ± 11.8 ^c	37.4 ± 16.6 ^b	36.4 ± 17.3 ^b	41.4 ± 15.4 ^a

Se muestran valores promedio ± desviación estándar.

^{a,b} Letras distintas indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$) entre tratamientos (columnas) para un mismo parámetro evaluado (hileras).

ble a los tratamientos de micronutrientes. El Mg elevó el rendimiento y el peso de 100 semillas en ambas especies y variedades evaluadas con fertilización foliar.

Los tratamientos individuales de B y Mg, mostraron efectos similares a la combinación B + Mg en la mayoría de los diferentes aspectos agronómicos, aunque la mezcla presentó mayores valores ($P \leq 0.05$) de biomasa e IC (Tabla 4). Sin embargo, este efecto de mejora fue distinto para las dos especies (Tabla 5), sugiriendo que no existe un efecto sinérgico entre estos micronutrientes bajo las condiciones del estudio. El que la aplicación de los dos elementos juntos, B + Mg, no mostrase una ventaja consistente sobre su administración individual en las diferentes características evaluadas, sugiere posibles interacciones antagónicas, o que las dosis óptimas de cada elemento cambian cuando se aplican en combinación.

Siddiqui y col. (2018) señalaron que el Mg ayuda en la protección de las plantas contra el estrés por calor al aumentar el área foliar, lo que resulta en mayor materia seca. Stagnari y col. (2009) estudiaron el efecto de la fertilización foliar de Mg (56 g/ha, 112 g/ha y 224 g/ha en aplicación única en la floración o dividiendo la administración en dos etapas, la mitad en etapa de cuatro hojas y la mitad en la floración) en dos genotipos de frijol ejotero, Bronco y Cadillac, y observaron que la fertilización en una sola dosis, incrementó de manera significativa el rendimiento de vainas frescas, en cada una de las 2 variedades estudiadas (78 % y 32 %, respectivamente). La aplicación dividida de Mg en dos etapas también fue efectiva al elevar el rendimiento en 109 % y 50 % para los 2 genotipos estudiados, respectivamente.

El incremento en las variables agronómicas por la adición de los minerales solos o combinados es relevante, considerando que, bajo estrés térmico severo, mantener o mejorar ligeramente el peso de semillas representa una ventaja adaptativa importante, ya que normalmente el estrés por calor reduce significativamente este parámetro (Porch y Jahn, 2001).

En términos prácticos, dicho aumento podría traducirse en mejor calidad comercial y vigor de la semilla, aspectos críticos para la productividad en ciclos subsecuentes bajo condiciones adversas, lo anterior podría deberse a la protección que aporta ese elemento al polen, principalmente en la etapa reproductiva, etapa extremadamente sensible al estrés por calor (Porch y Jahn, 2001). Un balance adecuado en la nutrición de los cultivos influye positivamente en su desarrollo vegetativo y reproductivo (Feng y col., 2023). Los resultados obtenidos muestran respuesta positiva en los parámetros de rendimiento para ambos nutrientes en los genotipos de frijol evaluados bajo las condiciones de estrés térmico del estudio.

Un hallazgo destacado fue que el testigo reportó la mayor biomasa (5 537.5 kg/ha) pero el menor IC (26.4 %), mientras que los tratamientos con fertilización foliar (B y/o Mg), presentaron menor biomasa, pero mayor eficiencia en la partición de asimilados hacia el grano (IC: 37.8 % a 41.4 %) (Tabla 4). Esto sugiere que, bajo estrés térmico, las plantas sin fertilización foliar destinan mayor proporción de fotoasimilados al crecimiento vegetativo como mecanismo de supervivencia, reduciendo la inversión reproductiva. La aplicación de B y Mg mejoró la eficiencia reproductiva probablemente al optimizar procesos críticos como la formación del tubo polínico (B) y la actividad enzimática fotosintética (Mg), favoreciendo la translocación de carbohidratos hacia los órganos reproductivos. Este fenómeno es consistente con lo reportado por Polania y col. (2016) en condiciones de estrés abiótico, donde la nutrición balanceada mejoró la partición de asimilados hacia el rendimiento económico.

Los tratamientos con fertilización foliar en cada genotipo revelaron respuestas diferenciales entre especies y variedades (Tabla 5). En la especie de *P. vulgaris*, el testigo de Granada mostró rendimientos de 1 398 kg/ha que fueron superados por los 3 tratamientos, siendo el de Mg el que obtuvo el mayor valor con 2 249 kg/ha; en tanto que, en Rarámuri, el testigo presentó 1 699 kg/ha, valor que fue supera-

■ Tabla 5. Efecto de los tratamientos de fertilización en las características agronómicas de los dos genotipos de frijol de *P. acutifolius*.

Table 5. Effect of fertilization treatments on the agronomic characteristics of the two *P. acutifolius* bean genotypes.

Parámetro	Testigo	B	Mg	B + Mg
<i>P. acutifolius</i>				
Alubia Choix				
Días a floración	41.7 ± 2.6 ^a	42.5 ± 2.7 ^a	42.5 ± 2.7 ^a	41.7 ± 2.6 ^a
Altura de planta (cm)	19.9 ± 1.9 ^a	21.3 ± 1.8 ^a	21.5 ± 1.7 ^a	21.4 ± 1.6 ^a
Número de vainas por planta	22.5 ± 9.5 ^{ab}	24.8 ± 8.7 ^a	22.7 ± 8.9 ^{ab}	24.0 ± 9.1 ^a
Número de semillas por vaina	4.8 ± 0.7 ^a	4.5 ± 0.6 ^a	5.2 ± 0.8 ^a	4.8 ± 0.7 ^a
Biomasa (kg/ha)	5 755 ± 1 809 ^a	4 229 ± 1 616 ^b	4 914 ± 1 592 ^a	3 467 ± 1 281 ^c
Peso de 100 semillas (g)	11.4 ± 0.7 ^a	11.6 ± 0.6 ^a	11.5 ± 0.6 ^a	11.8 ± 0.7 ^a
Rendimiento de grano (kg/ha)	1 377 ± 987 ^b	1 852 ± 923 ^a	1 764 ± 945 ^{ab}	1 639 ± 856 ^{ab}
Índice de cosecha (%)	20.9 ± 17.8 ^c	37.1 ± 16.2 ^{ab}	30.4 ± 15.8 ^b	45.2 ± 18.4 ^a
TARS-Tep 23				
Días a floración	46.7 ± 2.9 ^a	46.7 ± 2.9 ^a	46.7 ± 2.9 ^a	46.7 ± 2.9 ^a
Altura de planta (cm)	21.5 ± 0.7 ^a	21.7 ± 0.8 ^a	20.6 ± 0.9 ^a	22.1 ± 0.6 ^a
Número de vainas por planta	24.8 ± 8.7 ^b	28.8 ± 7.9 ^a	28.3 ± 8.2 ^a	28.8 ± 8.1 ^a
Número de semillas por vaina	4.5 ± 0.9 ^a	4.8 ± 0.8 ^a	5.0 ± 0.7 ^a	5.3 ± 0.6 ^a
Biomasa (kg/ha)	5 146 ± 1 616 ^b	5 601 ± 1 498 ^{ab}	6 429 ± 1 725 ^a	6 165 ± 1 632 ^a
Peso de 100 semillas (g)	12.5 ± 0.5 ^a	13.3 ± 0.4 ^a	13.3 ± 0.5 ^a	13.1 ± 0.4 ^a
Rendimiento de grano (kg/ha)	1 332 ± 84 ^b	1 413 ± 798 ^b	1 537 ± 823 ^{ab}	1 737 ± 845 ^a
Índice de cosecha (%)	22.9 ± 10.2 ^b	23.5 ± 9.8 ^b	21.4 ± 9.5 ^b	26.1 ± 10.8 ^a
<i>P. vulgaris</i>				
Granada				
Días a floración	48.3 ± 4.0 ^a	49.2 ± 3.8 ^a	47.5 ± 3.9 ^a	48.3 ± 4.0 ^a
Altura de planta (cm)	27.2 ± 1.4 ^a	25.7 ± 1.3 ^a	27.0 ± 1.5 ^a	25.7 ± 1.2 ^a
Número de vainas por planta	30.2 ± 5.8 ^a	29.8 ± 6.1 ^a	32.2 ± 5.5 ^a	30.0 ± 6.0 ^a
Número de semillas por vaina	5.3 ± 0.4 ^a	5.7 ± 0.5 ^a	5.3 ± 0.4 ^a	5.2 ± 0.4 ^a
Biomasa (kg/ha)	4 386 ± 1 993 ^a	4 149 ± 1 856 ^{ab}	4 720 ± 1 945 ^a	4 598 ± 1 823 ^a
Peso de 100 semillas (g)	25.7 ± 0.7 ^a	26.3 ± 0.6 ^a	26.3 ± 0.7 ^a	26.4 ± 0.6 ^a
Rendimiento de grano (kg/ha)	1 398 ± 734 ^b	2 222 ± 698 ^a	2 249 ± 765 ^a	2 022 ± 687 ^a
Índice de cosecha (%)	29.7 ± 13.2 ^b	53.2 ± 12.8 ^a	47.9 ± 13.5 ^{ab}	43.9 ± 12.9 ^{ab}
Rarámuri				
Días a floración	45.0 ± 2.9 ^a	47.5 ± 2.8 ^a	47.5 ± 2.8 ^a	46.7 ± 2.9 ^a
Altura de planta (cm)	30.9 ± 1.0 ^a	32.2 ± 0.9 ^a	32.5 ± 1.1 ^a	32.0 ± 0.8 ^a
Número de vainas por planta	27.3 ± 6.4 ^{ab}	30.3 ± 6.8 ^a	32.3 ± 6.2 ^a	29.8 ± 6.5 ^a
Número de semillas por vaina	5.3 ± 0.6 ^a	5.5 ± 0.5 ^a	5.5 ± 0.6 ^a	5.7 ± 0.4 ^a
Biomasa (kg/ha)	6 863 ± 1 481 ^a	6 442 ± 1 398 ^a	5 706 ± 1 523 ^{ab}	4 388 ± 1 325 ^b
Peso de 100 semillas (g)	32.8 ± 0.8 ^a	32.9 ± 0.7 ^a	33.3 ± 0.8 ^a	32.2 ± 0.7 ^a
Rendimiento de grano (kg/ha)	1 699 ± 660 ^b	2 335 ± 623 ^a	2 598 ± 689 ^a	2 198 ± 645 ^{ab}
Índice de cosecha (%)	24.2 ± 12.4 ^c	35.9 ± 11.8 ^b	45.7 ± 12.6 ^{ab}	50.3 ± 13.1 ^a

do por los tratamientos de B y Mg, siendo este último el de mayor rendimiento (2 598 kg/ha). En contraste, los genotipos de *P. acutifolius* mostraron menor respuesta, sin embargo, tuvieron

el mismo comportamiento que *P. vulgaris*; el testigo de Alubia Choix registró el valor inferior con 1 377 kg/ha; B reportó el valor máximo con 1 852 kg/ha. En TARS-Tep 23, el testi-

go obtuvo 1 332 kg/ha y B + Mg el mayor valor (1 737 kg/ha). Estos resultados evidencian que *P. vulgaris* fue más responsivo a la aplicación de micronutrientes que *P. acutifolius*, y ambos genotipos presentaron respuesta diferenciada.

La mejora en el rendimiento se asoció con características como mayor número de vainas por planta (Rarámuri: 32.3, 30.3 y 29.8 vainas para Mg, B y B + Mg vs 27.3 vainas en el testigo) y mayor IC (45.7 %, 35.9 % y 50.3 %, respectivamente, vs 24.2 % en el testigo). Altos valores de IC se asociaron con la obtención de rendimientos superiores en los tratamientos con fertilización foliar, lo que sugiere un efecto de los nutrientes aplicados en la asignación de asimilados a las estructuras reproductivas, aunque paradójicamente el testigo produjo la mayor biomasa total (6 863 kg/ha). Ello indica que, los micronutrientes mejoraron la eficiencia de partición hacia grano más que la producción total de biomasa. Siddiqui y col. (2018), reportaron resultados en *Vicia faba*, donde encontraron que la aplicación de Mg a la planta bajo condiciones de estrés por calor aumenta significativamente hasta un 53.14 % el área foliar, además de elevar la concentración de osmoprotectores como prolina (PRO) y glicina betaína (GB) en un 43.31 % y 47.10 %, respectivamente, en comparación con el testigo sin estrés por altas temperaturas.

En *P. acutifolius*, los tratamientos con fertilización foliar mejoraron significativamente el rendimiento de grano comparado con el testigo, especialmente en Alubia Choix, donde el tratamiento con B incrementó el rendimiento de 1 377 kg/ha a 1 852 kg/ha. El IC mostró las mejores respuestas, alcanzando valores superiores con la combinación B + Mg (45.2 %) en Alubia Choix, comparado con el testigo (20.9 %). En TARS-Tep 23, la aplicación de Mg favoreció significativamente la acumulación de biomasa (6 429 kg/ha vs 5 146 kg/ha del testigo), aunque el rendimiento de grano se mantuvo relativamente bajo en comparación con *P. vulgaris*. En *P. vulgaris*, la respuesta a la fertilización foliar fue más pronunciada. Granada mostró

incrementos notables en rendimiento con los tratamientos B y Mg (2 222 kg/ha y 2 249 kg/ha, respectivamente) comparado con el testigo (1 398 kg/ha). El IC en Granada aumentó significativamente con la aplicación de B (53.2 % vs 29.7 % del testigo), indicando una mejor partición de fotoasimilados hacia estructuras reproductivas. Rarámuri, la variedad de mayor rendimiento, respondió favorablemente a todos los tratamientos, alcanzando su mejor desempeño con Mg (2 598 kg/ha) y manteniendo el mayor IC con B + Mg (50.3 %).

Ambas variedades de frijol mostraron mejoras sustanciales en el IC con los tratamientos de micronutrientes, confirmandola eficiencia de la fertilización foliar en la partición de asimilados hacia órganos reproductivos bajo condiciones de estrés térmico.

Análisis de correlación

El análisis de correlación general reveló las interrelaciones entre las variables agronómicas evaluadas, independientemente del tratamiento de fertilización aplicado (Tabla 6). Los días a la floración mostraron correlaciones muy fuertes con la altura de planta ($r = 0.93^{***}$), el peso de 100 semillas ($r = 0.94^{***}$) y número de vainas por planta (0.82^{***}); fuertes con el rendimiento ($r = 0.52^{***}$) y la biomasa ($r = 0.55^{***}$); y correlación débil con el IC ($r = 0.21^{*}$). Esto indica que los genotipos con floración más tardía tendieron a tener plantas con mayor altura, producir semillas de mayor peso y mayor rendimiento, posiblemente por evadir parcialmente el estrés térmico temprano o por tener mayor tasa de llenado de vainas.

La altura de planta mostró correlaciones muy fuertes con el peso de 100 semillas ($r = 0.97^{***}$) y con el número de vainas por planta ($r = 0.74^{***}$), confirmando que plantas más altas tendieron a acumular mayor materia seca y producir más vainas. También reportó correlaciones moderadas con el rendimiento ($r = 0.42^{***}$), biomasa ($r = 0.38^{***}$) y número de semillas por vaina ($r = 0.33^{**}$). El número de vainas por planta presentó correlaciones muy fuertes con el peso de 100 semillas ($r = 0.73^{***}$) y rendimiento

■ Tabla 6. Coeficientes de correlación entre pares de variables determinadas en cuatro tratamientos de fertilización foliar de cuatro genotipos de frijol de las especies *P. vulgaris* y *P. acutifolius*.

Table 6. Correlation coefficients between pairs of variables determined in four foliar fertilization treatments of four bean genotypes of the species *P. vulgaris* and *P. acutifolius*.

	DF	ALT	NVP	NSV	BIO	P100S	RTO	IC
DF	1.00							
ALT	0.93***	1.00						
NVP	0.82***	0.74***	1.00					
NSV	0.32**	0.33**	0.22*	1.00				
BIO	0.55***	0.38***	0.65***	- 0.08 ns	1.00			
P100S	0.94***	0.97***	0.73***	0.29**	0.42***	1.00		
RTO	0.52***	0.42***	0.71***	0.08ns	0.57***	0.46***	1.00	
IC	0.21*	0.15ns	0.26*	0.11ns	0.19ns	0.17ns	0.82***	1.00

Escala de Cohen (1988): débil ($r = 0.10$ a 0.29), moderada ($r = 0.30$ a 0.49), fuerte ($r = 0.50$ a 0.70) y muy fuerte ($r > 0.70$). Los niveles de significancia estadística se indican como: *** $P < 0.001$, ** $P < 0.01$, * $P < 0.05$, ns = no significativo ($P \geq 0.05$). DF: días a floración, ALT: altura de planta, NVP: número de vainas por planta, NSV: número de semillas por vaina, BIO: biomasa aérea, P100S: peso de 100 semillas, RTO: rendimiento, IC: índice de cosecha.

($r = 0.71^{***}$), mientras que con biomasa tuvo una correlación moderada (0.65^{***}). Esto muestra al número de vainas como un componente importante en la productividad del frijol, tal y como lo observaron Anaya-López y col. (2022) en la misma localidad de prueba.

La biomasa presentó correlaciones positivas fuertes con el rendimiento ($r = 0.57^{***}$), y moderadas con el peso de 100 semillas ($r = 0.42^{***}$), indicando que la capacidad de acumulación de materia seca contribuye al rendimiento final.

El rendimiento mostró una correlación positiva muy fuerte con el IC ($r = 0.82^{***}$), confirmando su papel como indicador de eficiencia en la partición de fotoasimilados hacia estructuras reproductivas.

Sin embargo, el IC tuvo correlaciones no significativas con la biomasa ($r = 0.19$), el peso de 100 semillas ($r = 0.17$), el número de semillas por vaina ($r = 0.11$) y con altura de planta ($r = 0.15$).

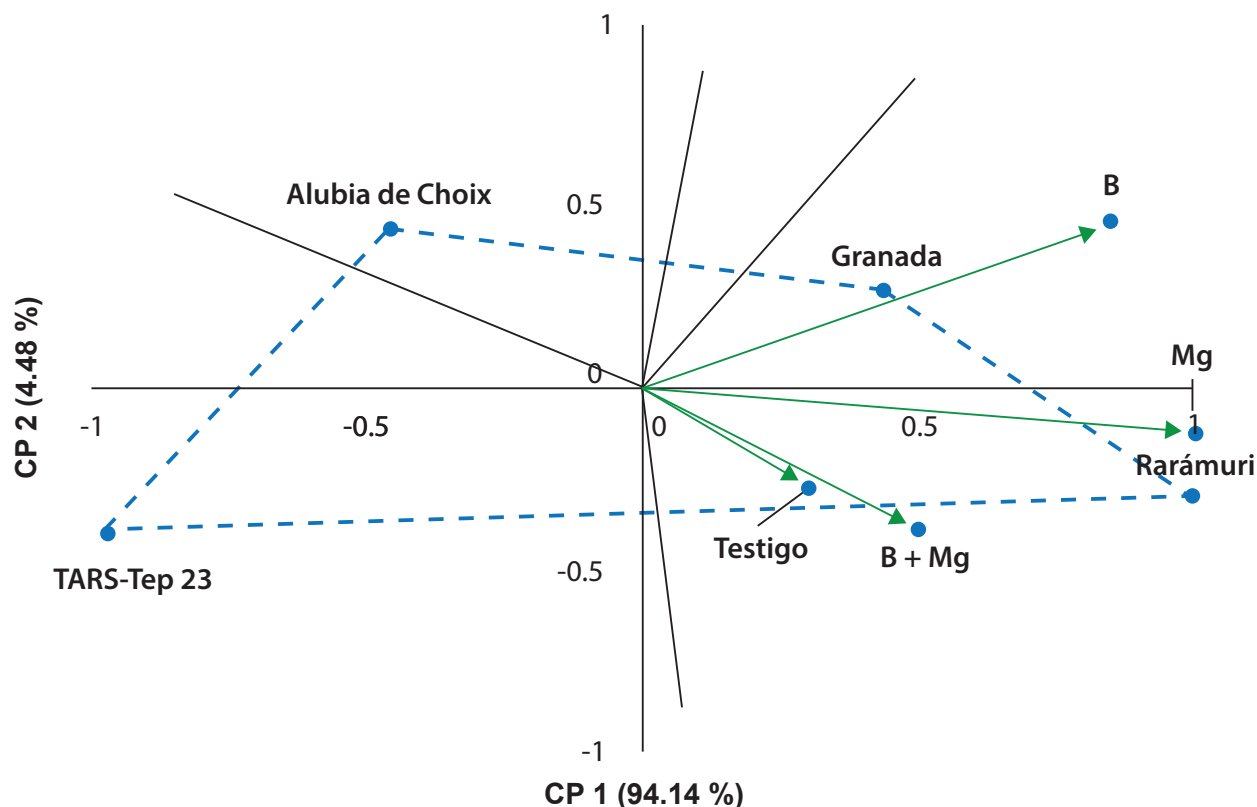
Estas correlaciones generales proporcionan el contexto para interpretar cómo los tratamientos de fertilización foliar influyeron en las variables de respuesta, considerando sus inte-

rrrelaciones naturales en el germoplasma evaluado.

Interacción genotipo por tratamiento

El análisis de la interacción entre genotipos y tratamientos de fertilización foliar, para el rendimiento, mostró que los dos primeros componentes principales explicaron el 98.62 % de la variación total (CP1 = 94.14 % y CP2 = 4.48 %), siendo el primer componente el que explicó la mayor proporción (Figura 2). El CP1 se asoció principalmente con el rendimiento del grano, mientras que el CP2 reflejó la respuesta diferencial a los tratamientos de fertilización foliar. En el biplot se observa la respuesta diferencial de los genotipos según su especie: los genotipos de *P. vulgaris* (Rarámuri y Granada) se ubicaron en el sector positivo del CP1 y mostraron respuesta positiva a la aplicación de fertilización foliar con B y Mg, mientras que los genotipos de *P. acutifolius* (Alubia Choix y TARS-Tep 23) presentaron una respuesta diferente a estos tratamientos.

En el cuadrante inferior derecho (valores positivos de CP1 y CP2) se ubicaron Rarámuri junto con los tratamientos Mg y B + Mg, indicando la mayor afinidad de esta variedad de *P. vulgaris* con la fertilización foliar. Granada



■ Figura 2. Parámetros de rendimiento, promedio de 2 años de estudio, de cuatro genotipos de frijol, dos de *P. vulgaris* y dos de *P. acutifolius* producidos bajo diferentes tratamientos de fertilización foliar con Boro (B) y Magnesio (Mg) y su combinación (B + Mg).

Figure 2. Yield parameters, average of 2 years of study, of four bean genotypes, two of *P. vulgaris* and two of *P. acutifolius* grown under different foliar fertilization treatments with Boron (B) and Magnesium (Mg) and its combination (B + Mg).

se posicionó en el cuadrante superior derecho, mostrando también respuesta favorable pero diferente a Rarámuri (Mg y B). Los tratamientos B y Mg se posicionaron muy próximos entre sí en el biplot, sugiriendo efectos similares sobre el rendimiento.

El tratamiento testigo se localizó en el cuadrante inferior derecho, aunque más cercano a la parte de la recta numérica negativa vertical, y al 0 de la horizontal, lo que indica diferencias en los requerimientos nutrimentales, ya que está próximo a B + Mg. Los genotipos de *P. acutifolius* (Alubia Choix y TARS-Tep 23) también se distribuyeron en diferentes cuadrantes, indicando respuestas variables entre ellos. TARS-Tep 23 se ubicó en el cuadrante inferior izquierdo, lo que sugiere diferencias en los requerimientos nutricionales y/o mecanis-

mos de absorción y utilización de micronutrientes entre especies. La fertilización combinada B + Mg se posicionó cerca del centro del biplot, indicando que mostró un efecto intermedio comparado con las aplicaciones individuales.

La respuesta diferencial de *P. acutifolius* a la fertilización foliar puede explicarse por diferencias intrínsecas en los mecanismos de absorción y translocación de micronutrientes entre especies. El frijol Tepari, adaptado evolutivamente a condiciones áridas con suelos de baja fertilidad, podría presentar menor capacidad de absorción foliar de B y Mg, o bien, sistemas de transporte internos menos eficientes para estos elementos (Rainey y Griffiths, 2005). Alternativamente, es posible que *P. acutifolius* requiera concentraciones o formula-

ciones diferentes de estos micronutrientes, o que su metabolismo celular bajo estrés térmico no se beneficie de la misma manera que *P. vulgaris*, de la aplicación exógena de estos elementos (Bornowski y col., 2023).

La posición de Rarámuri, en el extremo positivo del CP1 refleja su superioridad en rendimiento y respuesta a fertilización foliar (Figura 2). Estos resultados de la variedad Rarámuri se asociaron con el mayor rendimiento de grano, altura de planta, biomasa y peso de 100 semillas (Tabla 5), variables estrechamente ligadas con el rendimiento, como se confirmó en el análisis de correlación (Tabla 6). Klaedtke y col. (2012) reportaron que una mayor altura de planta está involucrada en una producción superior de biomasa, y este volumen de biomasa, puede significar mayor disponibilidad de fotoasimilados para la removilización y asignación de reservas de los tallos y ramas hacia las vainas y semillas, mejorando así los rendimientos bajo condiciones de estrés abiótico. Tene y col. (2023) analizaron la resistencia a calor de una amplia muestra de germoplasma de *P. vulgaris* y de otras especies del género *Phaseolus*, y señalaron que, aunque la mayoría de los genotipos estudiados de las especies *P. acutifolius*, *P. luna-*

tus y *P. coccineus*, resultaron más resistentes al calor que la mayoría de los genotipos de *P. vulgaris*, algunos genotipos de frijol común mostraron una respuesta similar a la de esas especies. Los resultados del presente trabajo confirman esta variabilidad intraespecífica, ya que Rarámuri tuvo una mejor adaptación relativa al estrés térmico comparado con Granada, evidenciado en su superior rendimiento bajo las condiciones del estudio. En su investigación, Tene y col. (2023), entre otras características agronómicas, encontraron que la biomasa mostró los efectos directos más altos en las calificaciones de resistencia al estrés por calor, lo que es consistente con los resultados obtenidos en este estudio, donde la mayor biomasa de Rarámuri se asoció con su superior rendimiento.

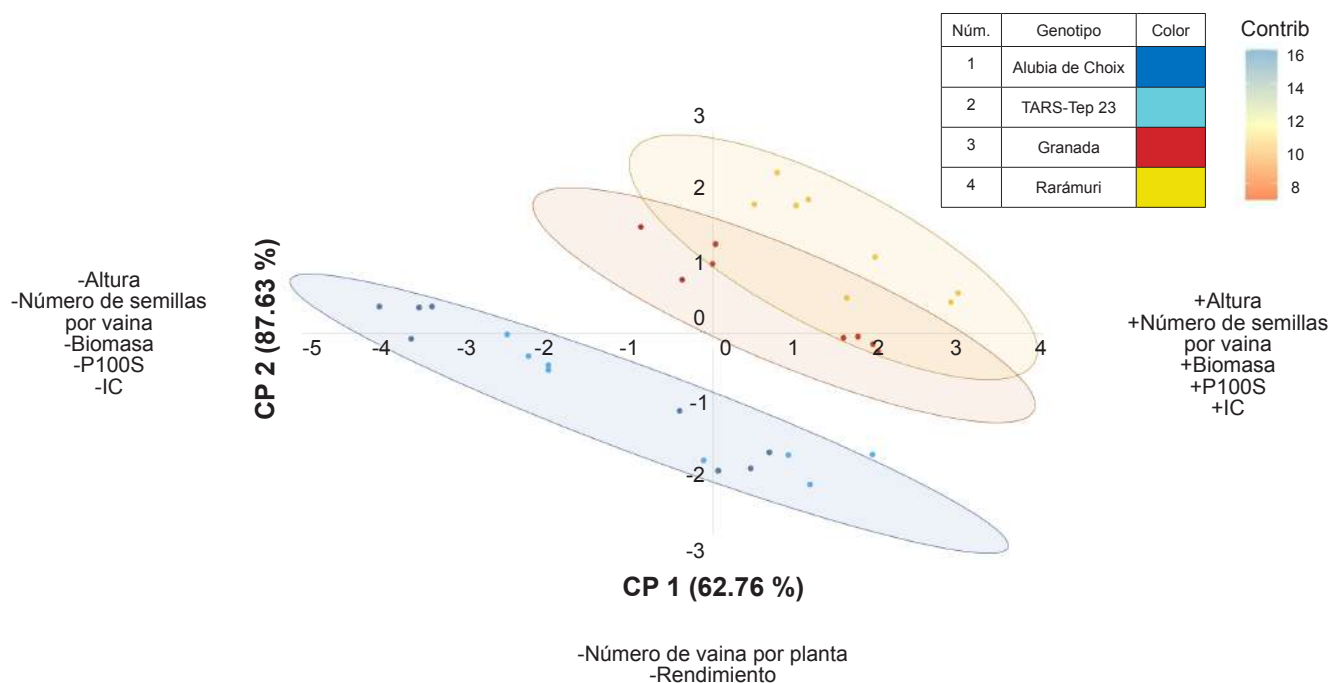
Análisis de componentes principales

El análisis de componentes principales de las variables agronómicas (Tabla 7) mostró que los primeros dos componentes explicaron el 87.63 % de la variación total (Figura 3). El CP1 con el 62.76 % de la variación estuvo definido principalmente por las variables número de vainas por planta y rendimiento, variables que entre sí presentaron una correlación positiva moderada ($r = 0.71^{***}$) (Tabla 6).

■ **Tabla 7. Análisis de componentes principales de variables agronómicas en cuatro genotipos de frijol bajo cuatro tratamientos de fertilización foliar.**

Table 7. Principal component analysis of agronomic variables in four bean genotypes under four foliar fertilization treatments.

Variable	CP1	CP2	Comunalidad
Días a floración	0.945	-0.046	0.895
Altura de planta	0.916	0.143	0.86
Número de vainas por planta	0.786	-0.337	0.731
Peso de 100 semillas	0.945	0.082	0.9
Rendimiento	0.57	0.738	0.869
Índice de cosecha	0.254	0.926	0.922
Biomasa	0.542	-0.322	0.397
Eigenvalue	4.393	1.741	
% Varianza explicada	62.76	24.87	
% Varianza acumulada	62.76	87.63	



■ Figura 3. Biplot de la contribución al rendimiento promedio de dos ciclos de cultivo, cuatro genotipos de frijol, dos de *P. vulgaris* y dos de *P. acutifolius*, y cuatro tratamientos de fertilización foliar. Los dos primeros componentes explicaron 87.63 % de la variación observada. Las tres elipses representan a cada genotipo y su respuesta a los factores en estudio. Las flechas son los valores 'eigen' que representan la contribución de cada característica.

Figure 3. Biplot of the contribution toward seed yield, average of two crop cycles, four bean genotypes, two of *P. vulgaris* and two of *P. acutifolius* and four foliar fertilization treatments. The first two components explained 87.63 % of the observed variation. The three ellipses represent each genotype and their response to the different factors studied. The arrows are the eigen values that represent the contribution of each trait.

El CP2, con una aportación a la varianza total del 24.87 %, se constituyó principalmente por las variables altura, número de semillas por vaina, biomasa, peso de 100 semillas (Figura 3), rasgos que también mostraron asociación positiva en el análisis de correlación (Tabla 6).

Esta separación en dos componentes principales indica que el rendimiento está determinado por dos estrategias principales: una basada en componentes reproductivos (vainas, semillas, días a floración) y otra en vigor vegetativo (altura, biomasa, peso de semillas).

Los resultados del análisis biplot (Figura 3) y los valores del CP1 con mayor contribución a la variabilidad total permitieron separar la población de datos en tres grupos distintos,

como se observa en las elipses de confianza. El grupo superior (elipse amarilla) corresponde principalmente a los genotipos de *P. vulgaris* (Rarámuri y Granada) bajo tratamientos de fertilización foliar, caracterizados por valores positivos en ambos componentes principales. El grupo central (elipse naranja) incluye a los genotipos de *P. vulgaris* bajo condiciones de testigo, con valores intermedios. El grupo inferior (elipse azul) agrupa a los genotipos de *P. acutifolius* (Alubia Choix y TARS-Tep 23) bajo todos los tratamientos, ubicados en valores negativos del CP1. A pesar de provenir de sitios geográficos diferentes, uno de México y otro de Puerto Rico, estas variedades mostraron comportamiento similar bajo las condiciones del estudio. La clara separación en tres grupos refleja las diferencias in-

trínsecas entre especies y la respuesta diferencial a la fertilización foliar. En la localidad de prueba, representativa de la región de El Bajío, las variedades de *P. vulgaris* resultaron superiores a las de *P. acutifolius* en la mayoría de las variables evaluadas, especialmente cuando se aplicaron tratamientos de fertilización foliar, confirmando la mejor adaptación del frijol común a estas condiciones agroecológicas y su mayor respuesta a la nutrición foliar. La respuesta superior de los genotipos de *P. vulgaris* sobre los de *P. acutifolius* en condiciones de altas temperaturas, contradice la percepción tradicional que señala al frijol Tepari como más tolerante al calor (Rainey y Griffiths, 2005). Este hallazgo sugiere que la adaptación al estrés térmico es un fenómeno complejo que involucra tanto la constitución genética como la capacidad de respuesta a intervenciones nutricionales.

Análisis de semilla por efecto de genotipo y tratamiento de fertilización foliar

No hubo diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre genotipos para la variable de germinación, resultando todos los materiales con germinación superior al 90 % (Tabla 8). La prueba de vigor (emergencia de radícula a los 4 d) mostró diferencias significativas ($P \leq 0.05$)

entre genotipos, resultando superiores los genotipos de *P. acutifolius* en comparación con *P. vulgaris*, desde un 10 % más de raíces emergidas en 4 d. Este resultado se debe probablemente a una cubierta de la testa de menor grosor que la de *P. vulgaris*, tal y como lo indican Jiménez-Galindo y Acosta-Gallegos (2012), quienes mencionaron que en algunos materiales, la germinación se genera a partir del segundo día después de que se presenten las condiciones favorables para la germinación por su rápida absorción de agua.

Prueba de germinación y vigor de semilla por efecto de tratamiento

Los tratamientos de fertilización foliar afectaron significativamente la calidad de semilla cosechada. Los tratamientos B, Mg y B + Mg alcanzaron valores de germinación superiores al 92 %, mientras que el testigo obtuvo un 88.3 % (Tabla 9). La emergencia de radícula se incrementó de 64.5 % en el testigo hasta 68 % o 69 % en los tratamientos con fertilización foliar. Hubo diferencias significativas en el número de semillas muertas, con respecto al testigo, que presentó un mayor número, así como un menor porcentaje de plántulas normales, lo que tuvo como resultado un porcentaje más bajo de germinación. Esto indica que,

■ Tabla 8. Prueba de germinación y vigor de 50 semillas de cuatro genotipos de frijol, dos de *P. vulgaris* y dos de *P. acutifolius*, producidas bajo tratamientos de B y Mg.

Table 8. Germination and vigor test of 50 seeds of four bean genotypes, two of *P. vulgaris* and two of *P. acutifolius*, produced under B and Mg treatments.

Parámetro	<i>P. acutifolius</i>		<i>P. vulgaris</i>	
	Alubia Choix	TARS-Tep 23	Granada	Rarámuri
Normal	48.4 ± 0.5 ^a	48.0 ± 1.4 ^a	48.5 ± 0.7 ^a	48.3 ± 0.7 ^a
Anormal	0.5 ± 0.7 ^b	1.4 ± 1.0 ^a	0.7 ± 0.5 ^b	0.7 ± 0.8 ^b
Muerta	1.1 ± 0.8 ^a	0.7 ± 1.2 ^a	0.9 ± 1.0 ^a	1.0 ± 1.2 ^a
Germinación (%)	92.1 ± 2.8 ^a	90.4 ± 6.4 ^a	92.5 ± 4.8 ^a	91.5 ± 5.2 ^a
Peso fresco de plántula (g)	16.0 ± 2.2 ^c	12.4 ± 2.3 ^d	20.4 ± 4.9 ^b	27.1 ± 4.6 ^a
Peso seco de plántula	2.2 ± 0.6 ^b	2.7 ± 1.0 ^b	4.9 ± 1.3 ^a	4.1 ± 0.8 ^a
Emergencia de radícula*	75 ± 2.3 ^a	71 ± 2.6 ^a	60 ± 2.5 ^b	63 ± 1.8 ^b

*A 4 d de la siembra.

Se muestran valores promedio ± desviación estándar.

^{a,b} Letras distintas indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$) entre genotipos (columnas) para un mismo parámetro evaluado (hileras).

■ Tabla 9. Prueba de germinación y vigor de semillas de cuatro genotipos de frijol por efecto de tratamientos de B y Mg.

Table 9. Seed germination and vigor test of four bean genotypes by effect of B and Mg treatments.

Parámetro	Testigo	B	Mg	B + Mg
Normal	47.7 ± 1.0 ^b	48.5 ± 0.7 ^a	48.5 ± 0.7 ^a	48.5 ± 0.9 ^a
Anormal	1.0 ± 1.0 ^a	0.7 ± 0.8 ^a	0.7 ± 1.0 ^a	0.9 ± 0.8 ^a
Muerta	1.7 ± 1.4 ^a	0.7 ± 0.8 ^b	0.7 ± 0.9 ^b	0.6 ± 0.7 ^b
Germinación (%)	88.3 ± 5.8 ^b	92.7 ± 4.2 ^a	92.7 ± 4.0 ^a	92.7 ± 4.8 ^a
Peso fresco de plántula (g)	17.7 ± 6.5 ^b	18.7 ± 6.8 ^{ab}	20.1 ± 7.1 ^a	19.5 ± 7.2 ^{ab}
Peso seco de plántula	3.2 ± 1.6 ^a	3.5 ± 1.5 ^a	3.8 ± 1.7 ^a	3.3 ± 1.3 ^a
Emergencia de radícula*	64.5 ± 3.2 ^a	68.0 ± 2.8 ^a	68.0 ± 2.6 ^a	69.0 ± 3.1 ^a

*A 4 d de la siembra.

Se muestran valores promedio ± desviación estándar.

^{a,b}Letras distintas indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$) entre tratamientos (columnas) para un mismo parámetro evaluado (hileras).

la semilla tratada con fertilización foliar usando B y Mg fue superior significativamente en calidad a la del testigo (Tabla 9), lo que permite recomendar este tratamiento para elevar su calidad. Los tratamientos con B y Mg mejoraron significativamente la viabilidad de la semilla, posiblemente a través de su papel en el metabolismo de carbohidratos y la síntesis de proteínas durante el desarrollo del embrión, como se observa en los valores específicos de germinación y vigor (Tabla 9).

El efecto positivo de la fertilización foliar sobre la calidad de semilla puede explicarse por varios mecanismos fisiológicos relacionados con la nutrición de la planta madre durante el llenado de grano. En la mayoría de las especies vegetales cuando sus semillas son sometidas a temperaturas mayores a 30 °C se afecta de manera directa la producción de reguladores de crecimiento como citoquininas y auxinas (Chaves-Barrantes y Gutiérrez-Soto, 2017). Durante la etapa reproductiva para obtener las semillas utilizadas para la prueba se presentaron en campo temperaturas ≥ 30 °C. Si bien, las semillas se encuentran protegidas de manera natural dentro de las vainas, los resultados obtenidos mostraron mayor cantidad de semillas muertas en el tratamiento testigo, lo que conlleva a una menor germinación en comparación con los tratamientos donde la se-

milla se produjo bajo aplicación de nutrición foliar con B y Mg. En el caso del tratamiento testigo sin la fertilización foliar, se incrementó la presencia de semillas muertas y un menor porcentaje de germinación pudo deberse a la deshidratación de los tejidos del embrión que provocan las altas temperaturas en la formación de la semilla (Chaves-Barrantes y Gutiérrez-Soto, 2017).

Además, el peso fresco de la plántula del testigo fue inferior a todos los tratamientos con fertilización foliar, debido a que las altas temperaturas afectan considerablemente la permeabilidad de las membranas celulares en las radículas (Kurepin y col., 2015). Esta respuesta positiva de la calidad de semilla a la nutrición foliar tiene implicaciones importantes para los programas de producción de semilla de frijol, especialmente en regiones donde las altas temperaturas durante el llenado de grano pueden comprometer la viabilidad.

Los hallazgos obtenidos ofrecen alternativas viables para sistemas productivos en regiones propensas a altas temperaturas en el rango de las que se presentaron en la región donde se llevó a cabo el estudio, donde la combinación de germoplasma adaptado y manejo nutricional adecuado puede constituir una estrategia integral para mantener la producción de frijol

ante condiciones ambientales cada vez más extremas. Sin embargo, es importante reconocer que una limitación del presente estudio es la ausencia de un diseño experimental que incluya diferentes niveles controlados de temperatura, lo cual dificulta atribuir los efectos observados exclusivamente al estrés térmico. No obstante, los resultados obtenidos reflejan la respuesta de los genotipos y tratamientos bajo las condiciones térmicas naturales prevalientes durante los años de evaluación, por lo que futuras investigaciones deberían considerar, el uso de ambientes controlados o contrastantes para confirmar los mecanismos específicos de tolerancia al estrés por temperatura.

CONCLUSIONES

La fertilización foliar con micronutrientes demostró ser una estrategia efectiva para contrarrestar los efectos adversos de las altas temperaturas en el cultivo de frijol, evidenciando mecanismos diferenciales de respuesta entre especies y variedades. Este estudio revela que la aplicación de B y Mg, particularmente este último, no solo mejora parámetros productivos, sino que también influye positivamente en la calidad fisiológica de la semilla, aspecto fundamental para mantener la viabilidad del material genético en condiciones de estrés térmico. La respuesta superior

de los genotipos de *P. vulgaris* sobre los de *P. acutifolius* en condiciones de altas temperaturas contradice la percepción tradicional que señala al frijol Tepari como más tolerante al calor. Este hallazgo sugiere que la adaptación al estrés térmico es un fenómeno complejo que involucra tanto la constitución genética como la capacidad de respuesta a intervenciones nutricionales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) por el financiamiento otorgado a través del proyecto "Desarrollo de variedades mejoradas de frijol para México" (SIGI: 16215236227). El primer autor agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) por la beca nacional otorgada para realizar estudios de Maestría en Ciencias en Producción y Tecnología de Semillas, así como al Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Roque, por el apoyo brindado durante sus estudios de posgrado, del cual este trabajo forma parte de su tesis.

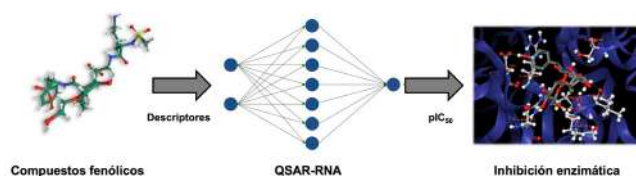
DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declararon no tener conflictos de intereses de ningún tipo.

REFERENCIAS

- Ahmad, W., Niaz, A., Kanwal, S., & Rasheed, K. (2009). Role of boron in plant growth: A review. *Journal of Agricultural Research*, 47(3), 329-338.
- Anaya-López, J. L., Rojas-Tovar, L. M., Cisneros-López, H. C. y Acosta-Gallegos, J. A. (2022). Rendimiento e índice de cosecha de germoplasma de frijol pinto y flor de mayo bajo estrés por temperatura alta. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 45(1), 33-33.
- Baloch, F. S., Nadeem, M. A., Sönmez, F., Habyarimana, E., Mustafa, Z., Karaköy, T., Cömertpay, G., Alsaleh, A., Çiftçi, V., Sun, S., Chung, G., & Chung, Y. S. (2022). Magnesium- a Forgotten Element: Phenotypic Variation and Genome Wide Association Study in Turkish Common Bean Germplasm. *Frontiers in Genetics*, 13, 848663. <https://doi.org/10.3389/fgene.2022.848663>
- Barrios-Gómez, E. J. y López-Castañeda, C. (2009). Temperatura base y tasa de extensión foliar en frijol. *Agrociencia*, 43(1), 29-35. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952009000100004
- Beebe, S. E., Rao, I. M., Cajiao, C., & Grajales, M. (2008). Selection for drought tolerance in common bean also improves yield in phosphorus limited environments. *Crop Science*, 48, 582-592
- Behera, B., Kancheti, M., Raza, M. B., Shiv, A., Mangal, V., Rathod, G., Altaf, M. A., Kumar, A., Aftab, T., Kumar, R., Tiwari, R. K., Lal, M. K., & Singh, B. (2023). Mechanistic insight on boron-mediated toxicity in plant vis-a-vis its mitigation strategies: a review. *International Journal of Phytoremediation*, 25(1), 9-26. <https://doi.org/10.1080/15226514.2022.2049694>

- Bornowski, N., Hart, J. P., Palacios, A. V., Ogg, B., Brick, M. A., Hamilton, J. P., Beaver, J. S., Buell, C. R., & Porch, T. (2023). Genetic variation in a tepary bean (*Phaseolus acutifolius* A. Gray) diversity panel reveals loci associated with biotic stress resistance. *The Plant Genome*, 16(3), e20363. <https://doi.org/10.1002/tpg2.20363>
- Cakmak, I. y Yazici, A. (2010). Magnesio: El elemento olvidado en la producción de cultivos. *Informaciones Agronómicas-IPNI*, 94(2), 23-25. [https://www.ipni.net/ppiweb/iaecu.nsf/\\$file/2.+Magnesio.+El+elemento+olvidado.pdf](https://www.ipni.net/ppiweb/iaecu.nsf/$file/2.+Magnesio.+El+elemento+olvidado.pdf)
- Chaves-Barrantes, N. F. y Gutiérrez-Soto, M. V. (2017). Respuestas al estrés por calor en los cultivos. I. aspectos moleculares, bioquímicos y fisiológicos. *Agronomía Mesoamericana*, 28(1), 237-253. <http://doi.org/10.15517/am.v28i1.21903>
- Cohen, J. (1988). Statistical power analysis for the behavioral sciences (Second edition). Lawrence Erlbaum Associates.
- Feng, Y., Fan, X., Suo, D., Zhang, S., Ma, Y., Wang, H., Guan, X., Yang, H., & Wang, C. (2023). Screening of heat stress-regulating active fractions in mung beans. *Frontiers in Nutrition*, 9, 1102752. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1102752>
- Jiménez-Galindo, J. C. y Acosta-Gallegos, J. A. (2012). Caracterización de genotipos criollos de frijol Tepari (*Phaseolus acutifolius* A. Gray) y común (*Phaseolus vulgaris* L.) bajo temporal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(8), 1565-1577. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342012000800007
- Kirkby, E. & Rómheld, V. (2008). Micronutrientes en la fisiología de las plantas: funciones, absorción y movilidad. *Informaciones Agronómicas*, 68(2), 9-13. <https://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/MicronutrientesenlaFisiologia.pdf>
- Klaedtke, S. M., Cajiao, C., Grajales, M., Polanía, J., Borrero, G., Guerrero, A., Rivera, M., Rao, I., Beebe, S. E., & León, J. (2012). Photosynthate remobilization capacity from drought-adapted common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) lines can improve yield potential of interspecific populations within the secondary gene pool. *Journal of Plant Breeding and Crop Science*, 4(4), 49-61. <https://doi.org/10.5897/JPBCS11.087>
- Kurepin, L. V., Park, J. M., & Lazarovits, G. (2015). Burkholderia phytofirmans-induced shoot and root growth promotion is associated with endogenous changes in plant growth hormone levels. *Plant Growth Regulation*, 75(1), 199-207. <https://doi.org/10.1007/s10725-014-9944-6>
- Mora, M., Ordaz, V., Castellanos, J. Z., Santelises, A. A., Gavi, F. y Volke, V. (2001). Sistemas de labranza y sus efectos en algunas propiedades físicas en un vertisol, después de cuatro años de manejo. *Terra Latinoamericana*, 19(1), 67-74.
- Omae, H., Kumar, A., & Shono, M. (2012). Adaptation to high temperature and water deficit in the common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) during the reproductive period. *Journal of Botany*, 2012, 803413. <https://doi.org/10.1155/2012/803413>
- Polanía, J., Rao, I. M., Cajiao, C., Rivera, M., Raatz, B., & Beebe, S. (2016). Physiological traits associated with drought resistance in Andean and Mesoamerican genotypes of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Euphytica*, 210(1), 17-29. <https://doi.org/10.1007/s10681-016-1691-5>
- Porch, T. G. & Jahn, M. (2001). Effects of high-temperature stress on microsporogenesis in heat-sensitive and heat-tolerant genotypes of *Phaseolus vulgaris*. *Plant, Cell and Environment*, 24(7), 723-731. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2001.00716.x>
- Rainey, K. M. y Griffiths, P. D. (2005) Respuesta diferencial de genotipos de frijol común a altas temperaturas. *Revista de la Sociedad Americana de Ciencias Hortícolas*, 130, 18-23. <https://doi.org/10.21273/JASHS.130.1.18>
- Siddiqui, M. H., Alamri, S. A., Al-Khaishany, M. Y. Y., Al-Qutami, M. A., Ali, H. M., Al-Whaibi, M. H., Al-Wahibi, M. S., & Alharby, H. F. (2018). Mitigation of adverse effects of heat stress on *Vicia faba* by exogenous application of magnesium. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 25(7), 1393-1401.
- Stagnari, F., Onofri, A., & Pisante, M. (2009). Response of French Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Cultivars to Foliar Applications of Magnesium. *Italian Journal of Agronomy*, 3, 101-110. <https://doi.org/10.4081/ija.2009.101>
- Tapia, G., Méndez, J., Inostroza, L., & Lozano, C. (2022). Water Shortage Affects Vegetative and Reproductive Stages of Common Bean (*Phaseolus vulgaris*) Chilean Landraces, Differentially Impacting Grain Yield Components. *Plants (Basel, Switzerland)*, 11(6), 749. <https://doi.org/10.3390/plants11060749>
- Tene, T. M., Sari, H., Canci, H., Maaruf, A., Eker, T., & Toker, C. (2023). Traits Related to Heat Stress in *Phaseolus* Species. *Agriculture*, 13(5), 953. <https://doi.org/10.3390/agriculture13050953>



Desarrollo de modelos QSAR por redes neuronales para la estimación de potenciales inhibidores de α -glucosidasa de fenólicos encontrados en matrices alimentarias

Development of QSAR models using neural networks for the estimation of potential α -glucosidase inhibitors from phenolics found in food matrices

Jesús Jaime Rochín-Medina*, Hilda Karina Ramírez-Medina, Luis Enrique Barreto-Salazar, Ángel Ismael Carrillo-Mendivil

RESUMEN

La α -glucosidasa es una enzima clave en la digestión de carbohidratos, y su inhibición representa una estrategia terapéutica para el control de la diabetes tipo 2. El objetivo del presente estudio fue desarrollar un modelo QSAR mediante una red neuronal (RNA) y acoplamiento molecular para estimar la inhibición de α -glucosidasa por compuestos fenólicos encontrados en matrices alimentarias (CF-MA). La RNA se construyó para estimar el valor de pIC_{50} a partir de CF-MA, utilizando distintas configuraciones de neuronas en la capa oculta. La mejor estimación de pIC_{50} se logró empleando un diseño de RNA con 7 neuronas en la capa oculta y dos descriptores moleculares (SpMin7_Bhm, AATSC5s). El acoplamiento molecular se realizó entre la α -glucosidasa (isomaltasa) y las moléculas de compuestos fenólicos que presentaron valores de pIC_{50} iguales o superiores a la acarbosa ($n = 17$). El modelo estimó que la naringina (-1.96) y la quercetina 3,4'-O-diglucósido diglucósido (-1.96) presentaron mayor energía libre de afinidad (-10.6 kcal/mol y -10.4 kcal/mol, respectivamente) frente a la α -glucosidasa, superando al control acarbosa ($pIC_{50} = -2.00$; y energía libre de afinidad -9.8 kcal/mol). La combinación de RNA y acoplamiento molecular permitió desarrollar una herramienta valiosa para estimar el potencial inhibitorio de los compuestos fenólicos frente a la enzima de α -glucosidasa.

PALABRAS CLAVE: red neuronal, modelo de predicción, acoplamiento molecular, compuestos fenólicos, inhibición enzimática.

ABSTRACT

α -Glucosidase is a key enzyme in carbohydrate digestion, and its inhibition represents a therapeutic strategy for the management of type 2 diabetes. The aim of this study was to develop a QSAR model using an artificial neural network (ANN) combined with molecular docking to estimate the inhibitory activity of α -glucosidase by phenolic compounds found in food matrices (PC-FM). The ANN was trained to predict pIC_{50} values using different configurations of hidden-layer neurons. The best estimation of pIC_{50} was achieved using an RNA design with 7 neurons in the occult layer and two molecular descriptors (SpMin7_Bhm, AATSC5s). Molecular docking was performed between α -glucosidase (isomaltase) and phenolic compounds that showed predicted pIC_{50} values equal to or higher than acarbose ($n = 17$). According to the model, naringin and quercetin 3,4'-O-diglucoside exhibited the lowest predicted pIC_{50} values (-1.96) and the highest binding affinities (-10.6 kcal/mol and -10.4 kcal/mol, respectively), outperforming the reference compound acarbose ($pIC_{50} = -2.00$; binding affinity = -9.8 kcal/mol). The integration of ANN-based QSAR modeling and molecular docking provides an efficient tool for screening the inhibitory potential of phenolic compounds against α -glucosidase enzyme.

KEYWORDS: neural network, predictive model, molecular docking, phenolic compounds, enzyme inhibition.

*Correspondencia: jesus.rm@culiacan.tecnm.mx/Fecha de recepción: 6 de julio de 2025/Fecha de aceptación: 13 de noviembre de 2025/ Fecha de publicación: 19 de noviembre de 2023.

Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Culiacán, Laboratorio de Microbiología Molecular y Bioactivos, calle Juan de Dios Bátiz 310 pte., colonia Guadalupe, Culiacán, Sinaloa, México, C. P. 80220.

INTRODUCCIÓN

La diabetes mellitus es un padecimiento que eleva los niveles de azúcar en sangre (hiperglucemia) e índice anormalidades en el sistema metabólico, por lo que representa un desafío significativo para la salud. Si no se controla, esta condición puede causar graves daños en diversos órganos y tejidos, incluidos los nervios y vasos sanguíneos (Yoshikawa y col., 2022). La regulación de la liberación de glucosa en el tracto intestinal, a partir de los almidones y otros carbohidratos, para evitar su posterior absorción, puede lograrse mediante la inhibición de la α -amilasa pancreática, enzima perteneciente al grupo de las α -glucosidasas que hidroliza el enlace glucosídico α -1 $\rightarrow$ 4. Este mecanismo es crucial en el control de la hiperglucemia, lo que lo convierte no solo en un área clave de investigación, sino en una preocupación de salud urgente que requiere atención e intervención (Poovitha y Parani., 2016).

La Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos, aprueba los inhibidores de α -glucosidasas para el tratamiento de pacientes con diabetes tipo 2. Estos pueden utilizarse solos, para reducir la hiperglucemia, o en combinación con otros fármacos antidiabéticos convencionales, en pacientes con niveles excesivos de glucosa en sangre después de consumir dietas altas en carbohidratos (Hossain y col., 2020). Por lo tanto, encontrar compuestos bioactivos naturales inhibidores de α -glucosidasas es una alternativa para coadyuvar a atender este problema de salud.

La enzima isomaltasa es otra enzima perteneciente al grupo de las α -glucosidasas, presente en muchos organismos, incluyendo el ser humano (isomaltasa intestinal), en el que es parte esencial del sistema digestivo. Es responsable de hidrolizar los enlaces glucosídicos α -1 $\rightarrow$ 6 presentes en la amilopectina, oligosacáridos y dextrinas, ayudando a liberar moléculas de glucosa que son absorbidas en el intestino delgado (Sim y col., 2010). En consecuencia, la inhibición de la isomaltasa

se puede reducir la tasa de digestión de carbohidratos y la absorción de glucosa, disminuyendo los niveles de azúcar en sangre (Chen y col., 2020). La inhibición de esta enzima, de origen microbiano, se usa regularmente en estudios de inhibición por su facilidad de obtención y disponibilidad comercial. Adicionalmente, los inhibidores de isomaltasas tienen la capacidad de inhibir a otras enzimas del grupo de las α -glucosidasas, incluyendo las enzimas pancreáticas humanas, por su similitud estructural (Sim y col., 2010).

Las matrices alimentarias y los residuos agroindustriales son fuentes potencialmente valiosas para incorporarlas en nuevos productos alimenticios o para extraer de ellas compuestos bioactivos. Diversos estudios destacan la riqueza y diversidad de los compuestos fenólicos en fuentes vegetales, sus métodos de extracción, así como su potencial para aplicaciones funcionales y nutraceuticas (Manach y col., 2004; Wang y col., 2020). Una de las bases de datos con mayor número de compuestos fenólicos disponibles es Phenol-Explorer, en esta se reúne información detallada sobre los compuestos fenólicos contenidos en alimentos, sus formas químicas, biodisponibilidad y metabolismo (Neveu y col., 2010; Rothwell y col., 2013). Su uso facilita la identificación de perfiles fenólicos en matrices alimentarias, así como la selección de compuestos individuales, lo que permite su integración en análisis *in silico*, mediante la integración de otras bases de datos moleculares, como ChEMBL, PubChem y otras plataformas especializadas (Rothwell y col., 2013; Zdravil y col., 2024).

El potencial de los compuestos fenólicos de matrices alimentarias (CF-MA) en la inhibición enzimática ha sido un tema de interés, con estudios que atribuyen un efecto antihiperglucémico a su actividad inhibidora sobre la enzima α -glucosidasa (Salazar-López y col., 2020; Alongi y col., 2021; Doungwichitrkul y col., 2024). Sin embargo, debido a la no comercialización de algunos CF-MA, solo unos pocos se han probado *in vitro*. Por lo tanto, el uso de alternativas computacionales para

evaluar el potencial de dichos compuestos antes del análisis *in vitro* e *in vivo* es una dirección prometedora en este campo de investigación (Pinzi y col., 2019).

Una estructura química se correlaciona cuantitativamente con la actividad biológica o la reactividad química mediante el uso de descriptores moleculares, que capturan propiedades fisicoquímicas, topológicas y electrónicas de la molécula. Estas relaciones pueden modelarse matemáticamente mediante técnicas como el método de relación estructura-actividad cuantitativa (QSAR, por sus siglas en inglés: Quantitative Structure-Activity Relationship), permitiendo predecir la actividad biológica a partir de la estructura (Patra y Chua 2010; Hung y Gini 2021). Estos modelos permiten identificar patrones en grandes volúmenes de datos químicos previos al desarrollo de ensayos biológicos exhaustivos, lo cual representa una ventaja significativa en términos de tiempo, costo y eficiencia (Cherkasov y col., 2014). Sin embargo, la construcción de modelos QSAR robustos implica un flujo de trabajo que abarca múltiples etapas, las cuales incluyen la preparación y curación de datos, detección de valores atípicos, balanceo de conjuntos de datos, una rigurosa validación interna y externa, así como el establecimiento de dominios de aplicación para asegurar confiabilidad en las predicciones del modelo al predecir nuevos compuestos (Tropsha, 2010).

El progreso de la informática en los últimos años, ha llevado al aumento del uso de técnicas de inteligencia artificial para resolver problemas relacionados con la estimación de variables en procesos de diferentes campos de estudio (Gupta y col., 2021; Javaid y col., 2022). Una de estas técnicas es el uso de redes neuronales artificiales (RNA), que crean modelos de estimación a partir de datos obtenidos experimentalmente (Chapman y col., 2022).

Las RNA se ha convertido en una herramienta valiosa en algunas investigaciones porque modelan el comportamiento de un proceso fí-

sico, fisiológico, químico y biológico, que puede ser complejo de representar utilizando modelos matemáticos (Taiwo y col., 2022). Por esta razón, es posible crear un modelo con RNA utilizando datos experimentales. Además, se han desarrollado modelos QSAR asistidos por RNA para estimar actividad biológica, como la mutagenicidad bacteriana, inhibición enzimática relacionadas a enfermedades mentales y cardiovasculares, entre otras (Patra y Chua 2010; Hung y Gini, 2021; Xu, 2022; El-fadili y col., 2023).

El objetivo de este estudio fue desarrollar un modelo QSAR asistido por RNA, complementado con estudios de acoplamiento molecular, con el fin de estimar la capacidad inhibidora de compuestos fenólicos presentes en matrices alimentarias, frente a una enzima α -glucosidasa isomaltasa microbiana.

MATERIALES Y MÉTODOS

Análisis discriminante sobre descriptores moleculares contra la actividad inhibidora de la α -glucosidasa

Se optimizó la respuesta del modelo de RNA mediante un análisis discriminante de los descriptores moleculares y la actividad inhibidora de la α -glucosidasa. Para ello, se consideraron 35 compuestos reportados en la base de datos ChEMBL (identificador de bioactividad de ensayos: ChEMBL1152716) (Zdravil y col., 2024; European Bioinformatics Institute, 2025). Este conjunto de compuestos, con sus respectivos valores experimentales de IC_{50} contra α -glucosidasa microbiana (isomaltasa de *Saccharomyces cerevisiae*), permitió determinar los descriptores moleculares utilizados como datos de entrada en el diseño de la RNA.

Los descriptores moleculares (1D y 2D) se obtuvieron utilizando el software PaDEL-Descriptor, versión 2.21, a partir de la Especificación Simplificada de Entrada Molecular Lineal (SMILES, por sus siglas en inglés: Simplified Molecular Input Line Entry System), tomando en cuenta aproximadamente 1 444 descriptores con distintas características, entre

ellos algunos comúnmente usados en QSAR como LogP y MR (Daoui y col., 2022). Posteriormente, se eliminaron todas las columnas que contenían valores nulos o constantes (columnas con más del 50 % de este tipo de datos) para evitar errores potenciales en las operaciones de matrices. Después de este proceso de filtrado, se realizó el análisis de correlación múltiple de Pearson y covarianza con todos los descriptores moleculares restantes, seleccionando sólo aquellos que no tuvieran dependencia estadística.

El número óptimo de descriptores y su contribución a la variabilidad de los datos (considerando aquellos que explicaran al menos el 80 % de la variabilidad total) se obtuvo por un análisis de componentes principales (ACP). Se redujo la multicolinealidad en el modelo por medio de un análisis de conglomerados permitiendo clasificar los descriptores en familias según su similitud. Dentro de cada grupo, se seleccionó el descriptor con la mayor correlación con la actividad inhibitoria (IC_{50} , que representa la concentración molar -M- que inhibe un efecto al 50 %), eliminando aquellos que fueran altamente correlacionados entre sí y procurando la representatividad de las familias de datos. Todos los análisis estadísticos fueron realizados utilizando el software estadístico Minitab® (Minitab Statistical Software), versión 21.

Modelo QSAR con RNA

La RNA utilizó Regularización Bayesiana para predecir el valor de pIC_{50} ($-\log IC_{50}$) (Zerroug y col., 2021) a partir del conjunto de datos de CF-MA obtenido de la base de datos Phenol-Explorer (Neveu y col., 2010; Phenol-Explorer, 2025), con un total de 501 fenoles disponibles en la plataforma.

La RNA se construyó a partir de descriptores moleculares mediante el análisis discriminante, el cual consideró la correlación de Pearson (r), el gráfico de sedimentación (que permitió identificar los componentes con mayor varianza explicada) y el análisis de conglomerados; dichos descriptores mostraron una correlación significativa ($P \leq 0.05$) frente a la ac-

tividad inhibidora de la enzima α -glucosidasa (pIC_{50}) obtenida de la base de datos ChEMBL.

La RNA se construyó utilizando el 80 % de los datos para el entrenamiento y el 20 % restante para pruebas y validación. Se probaron cinco modelos con un número diferente de neuronas en la capa oculta (3, 5, 7, 9 y 15 neuronas). Estos modelos se desarrollaron en la plataforma MATLAB utilizando la herramienta *nftool*. El error cuadrático medio (MSE, por sus siglas en inglés: Mean Squared Error) se usó para medir la precisión de la RNA, mientras que el valor de R se empleó para cuantificar la relación entre los valores experimentales de pIC_{50} y los valores predichos por la RNA, permitiendo así evaluar la capacidad predictiva del modelo. El modelo de RNA seleccionado se utilizó para predecir el valor de pIC_{50} de todos los compuestos fenólicos presentes en la base de datos. Posteriormente, se seleccionaron los compuestos con un pIC_{50} superior al de la acarbosa (usada como control positivo) para proceder con el acoplamiento molecular.

Acoplamiento molecular

Se realizaron estudios de acoplamiento molecular entre los ligandos (CF-MA obtenidos de Phenol-Explorer) e isomaltasa de *Saccharomyces cerevisiae* (PDB 3AJ7), una α -glucosidasa microbiana con un 72 % de homología con la isomaltasa humana (Yue y col., 2017) por lo que su uso como modelo estructural resulta adecuado para la evaluación comparativa de potenciales inhibidores de α -glucosidasas, ya que la inhibición observada sobre una α -glucosidasa suele ser compatible con la inhibición potencial de otras enzimas homólogas (Poovitha y Parani, 2016). Para este análisis, se seleccionaron únicamente aquellos CF-MA con valores de pIC_{50} mejores al control (acarbosa) y que mostraran interacción con al menos uno de los residuos catalíticos reportados para α -glucosidasa: Asp215, Glu277 y Asp352 (Yamamoto y col., 2010).

Las estructuras de los ligandos se obtuvieron de PubChem (National Library of Medi-

cine, 2025); la estructura proteica de la isomaltasa (PDB 3AJ7) se obtuvo del Banco de Datos de Proteínas RCSB (RCSB Protein Data Bank, 2025). La preparación de los archivos para el acoplamiento se realizó mediante la interfaz de AutodockTools v1.5.6, donde se añadieron cargas de Gasteiger; también se definieron los residuos catalíticos y se configuraron las cajas de búsqueda (Grid box). Las energías de afinidad (Vina score) se procesaron usando el software libre AutoDock, versión Vina v1.1.2

Se llevó a cabo el acoplamiento molecular rígido, manteniendo la estructura de la proteína completamente fija y utilizando un Grid box de $27 \times 27 \times 27$ con un espaciado de 0.375 Å, con cada uno de los ligandos preparados. Posteriormente, se realizó el acoplamiento molecular flexible, seleccionando únicamente los compuestos con mayores valores de energía de afinidad que superaron al del control (acarbose). Para este caso se seleccionaron únicamente a los residuos catalíticos (Asp215, Glu277 y Asp352) como flexibles, ajustando también el tamaño del Grid box para cubrir de forma precisa la zona activa. Las interacciones resultantes de cada análisis se visualizaron mediante Discovery Studio Visualizer 2021 Client, en formato 2D.

Finalmente, los compuestos con mejor desempeño en estas etapas fueron sometidos a un acoplamiento molecular 3D utilizando el software AIDDISON™ (versión 24.0.5.0; plataforma en línea desarrollada por Sigma-Aldrich) (Rusinko y col., 2024), seleccionando la caja de búsqueda correspondiente al sitio activo (Asp215, Glu277 y Asp352), además de incluir moléculas de agua y los iones metálicos presentes en la enzima, también se empleó a la acarbose como control.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

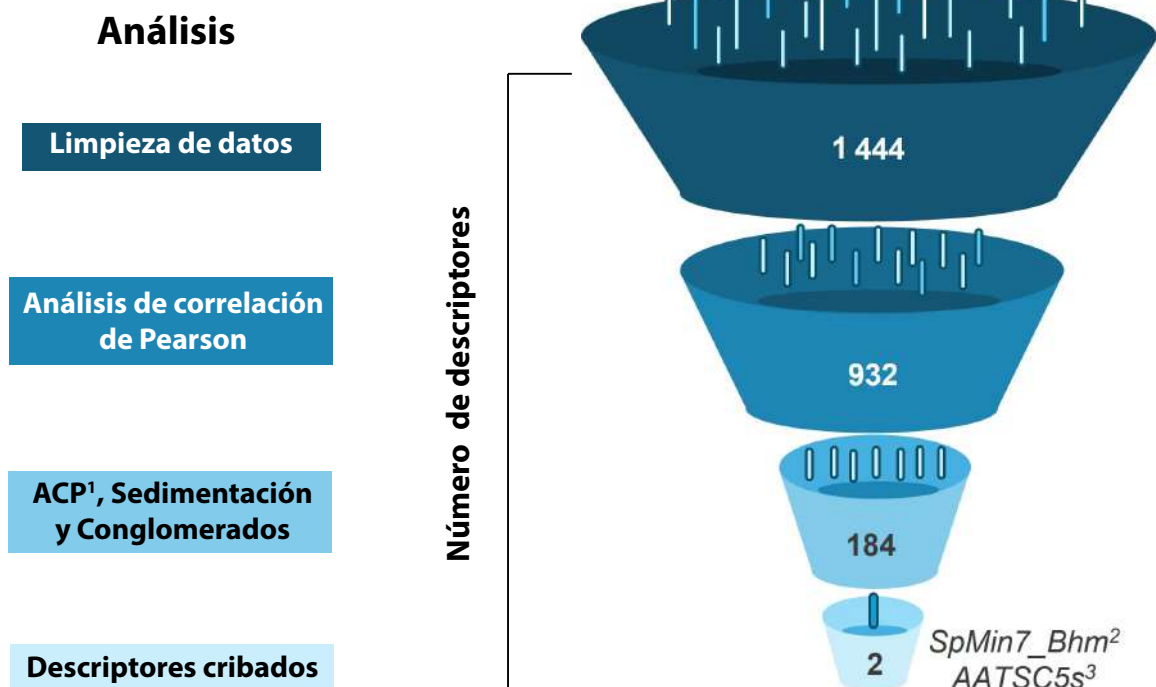
Análisis discriminante sobre descriptores moleculares contra la actividad inhibidora de la α -glucosidasa

La eliminación de los datos inconsistentes o duplicados de los 35 compuestos iniciales

obtenidos de la base de datos de ChEMBL, permitió obtener 30 compuestos finales para el entrenamiento. El flujo de trabajo para cada una de las etapas del análisis está representado en la Figura 1, mostrando el número de descriptores resultantes y el análisis aplicado para cada etapa. Los 1 444 descriptores moleculares inicialmente obtenidos para cada compuesto, se redujeron a 932 descriptores después del proceso de limpieza (eliminación de duplicados y de datos incompletos o constantes); mediante el análisis de correlación de Pearson entre los descriptores y el valor de pIC_{50} , se seleccionaron aquellos descriptores con un coeficiente de correlación (valor r) menor a -0.7 (para correlaciones negativas) y superior a 0.7 (para correlaciones positivas), un valor considerado alto para correlaciones y/o colinealidades (Simeon y Jongkon, 2019), resultando un total de 184 descriptores depurados.

El ACP a través del análisis de sedimentación (Figura 2) indicó que 2 descriptores permiten explicar al menos un 90 % de la variabilidad total, lo que sugiere que es posible utilizarlos para representar el modelo sin una pérdida significativa de precisión (80 %). Los resultados preliminares mostraron que el descriptor SpMin7_Bhm, presentó la mayor correlación positiva ($r = 0.89$) y AATSC5s la mayor correlación negativa ($r = -0.87$) contra la variable de respuesta (pIC_{50}) con valor significativo ($P \leq 0.001$). Una correlación positiva indica una relación directa con el pIC_{50} (incremento), mientras que una negativa señala una relación inversa (disminución). Este contraste es útil porque aporta información complementaria y mejora la robustez del modelo (Minitab Support, 2023).

El análisis de conglomerados (Figura 3) mostró que los descriptores SpMin7_Bhm y AATSC5s presentaron una distancia euclidiana de 4.78, lo que indica una baja covariabilidad y los vuelve adecuados para la construcción del modelo, por lo que fueron seleccionados como las variables de entrada para diseñar el modelo de RNA.



■ Figura 1. Análisis del cribado de descriptores moleculares para la actividad inhibidora de la α -glucosidasa. ¹Análisis de componentes principales. ²Valor propio absoluto de un nivel de la matriz de Burden modificada, ponderada por la masa relativa de los átomos. ³Autocorrelación de Broto-Moreau ponderada por el índice electrotopológico atómico.

Figure 1. Analysis of molecular descriptor screening for α -glucosidase inhibitory activity. ¹Principal component analysis. ²Absolute eigenvalue of the level of the modified Burden matrix, weighted by the relative atomic mass. ³Broto-Moreau autocorrelation weighted by the atom electrotopological index.

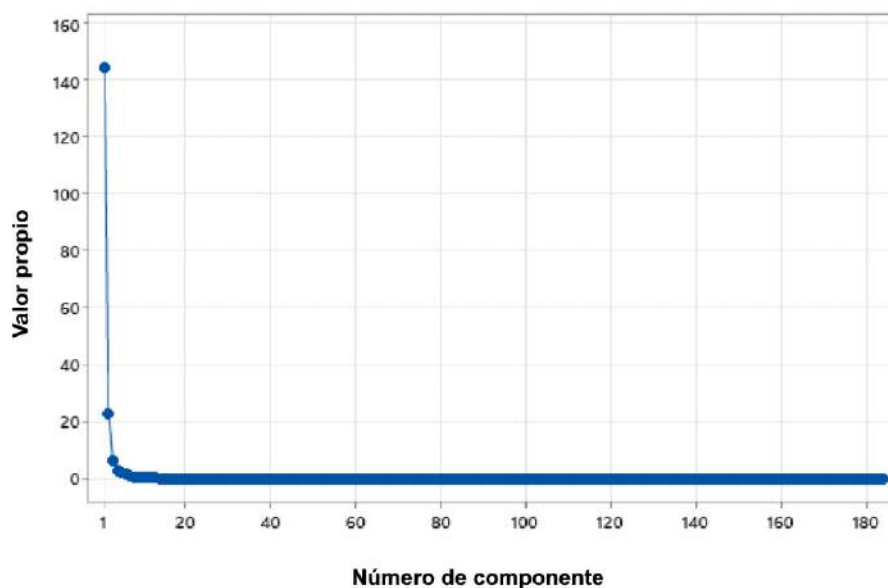
El descriptor SpMin7_Bhm se basa en propiedades topológicas y representa la energía mínima estandarizada de Burden en el séptimo orden, capturando cómo la distribución de la densidad electrónica y la conectividad del esqueleto molecular pueden influir en la afinidad por el sitio activo de la enzima (Burden, 1989; Todeschini y Consonni, 2009). Por su parte, AATSC5s pertenece a la familia de descriptores autocorrelativos y refleja la suma de cargas parciales ponderadas por la distancia topológica en la quinta posición, proporcionando información sobre cómo la distribución de carga a lo largo de la molécula puede facilitar o dificultar interacciones electrostáticas con residuos catalíticos (Todeschi-

ni y Consonni, 2009; Yap, 2011). Diversos estudios mencionan la importancia de los descriptores del tipo topológico, ya que se les ha asociado con actividad biológica, debido a la distribución de la carga y cómo dichas características son cruciales para ensayos de ese tipo (Gálvez y col., 2002; Singh y col., 2009; Emonts y col., 2023). Por lo tanto, moléculas con valores específicos de estos descriptores pueden mostrar mayor o menor afinidad por la enzima, alterando su capacidad inhibitoria.

Algunos estudios destacan la importancia de utilizar descriptores como LogP y MR en ensayos QSAR (Daoui y col., 2022; El-fadili y col., 2023), sin embargo, en este ensayo no mos-

a)

Gráfica de sedimentación



b)

Análisis de los vectores y valores propios de la matriz de correlación

Valor propio	144.26	23.02	6.11	2.89	2.13	1.67	1.12	0.73	0.57	0.32	0.25
Proporción	0.784	0.125	0.033	0.016	0.012	0.009	0.006	0.004	0.003	0.002	0.001
Acumulada	0.784	0.909	0.942	0.958	0.97	0.979	0.985	0.989	0.992	0.994	0.995

■ Figura 2. Resultados del análisis de componentes principales (ACP). (a) Gráfico de sedimentación de los valores propios; (b) Tabla de valores propios y varianza explicada.

Figure 2. Principal component analysis (PCA) results. (a) Scree plot of eigenvalues; (b) Eigenvalues and explained variance table.

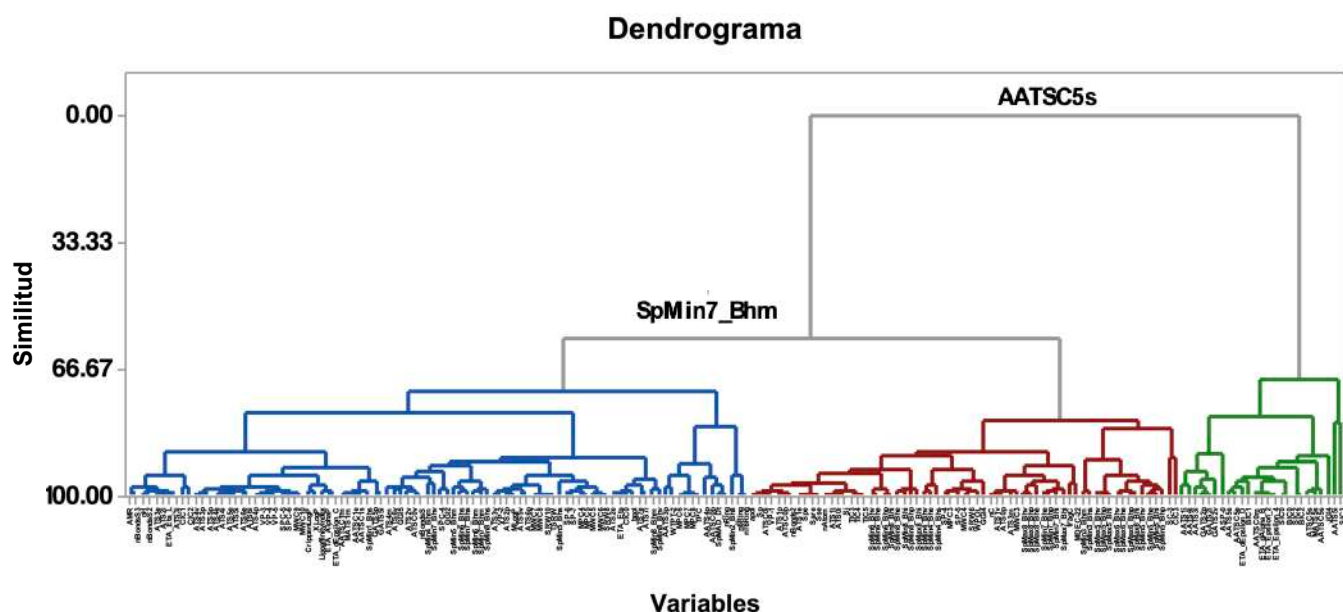
traron una correlación significativa con la actividad inhibitoria de la α -glucosidasa, por lo tanto, no fueron incluidos en el modelo, lo que resalta la importancia de seleccionar descriptores específicos y representativos para cada conjunto de datos.

Modelo QSAR con RNA

Los valores estimados de los cinco modelos construidos inicialmente con 3, 5, 7, 9 y 15 neuronas en la capa oculta para la estimación del pIC_{50} , se compararon con los valores de entrenamiento (Tabla 1). Los valores de MSE y R fueron calculados para cada modelo, y los criterios de selección del modelo se basaron en el MSE más bajo y un valor R cercano a 1 (Zerroug y col., 2021). Los modelos con

5, 7 y 9 neuronas presentaron un MSE más bajo y un valor R más cercano a 1 durante la etapa de entrenamiento en comparación con los modelos con 3 y 15 neuronas. Sin embargo, al comparar los valores de MSE y R del modelo con 7 neuronas con el modelo con 9 neuronas, se presentó una diferencia de 0.001 en el MSE y 0.013 en el valor R en la etapa de entrenamiento, mostrando un rendimiento ligeramente superior el modelo con 9 neuronas. No obstante, en la fase de prueba, el modelo con 7 neuronas reportó un mejor desempeño, con un MSE más bajo y un valor de R más cercano a 1 (Figura 4).

Los resultados de prueba mostraron una mejora en los valores de MSE y R del modelo



■ Figura 3. Análisis de conglomerados de los descriptores moleculares.

Figure 3. Cluster analysis of molecular descriptors.

de 7 neuronas en comparación con los modelos con 3, 5, 9 y 15 neuronas, que no reportaron mejora (presentaron valores de MSE más altos y valores R más alejados de 1). El modelo estimado con 7 neuronas se ajustó a los valores de entrenamiento (Figura 5a). La evaluación de los resultados de prueba (Figura 5b) mostró que la línea de regresión se ajusta a los datos, indicando que el modelo puede predecir datos previamente no observados y manejar información general desconocida.

El modelo con 7 neuronas en la capa oculta fue seleccionado para estimar el pIC_{50} , resultando en un MSE de 0.010 5 y un valor R de 0.942 6 en el entrenamiento (Figura 5a), valores que indican una alta eficiencia predictiva. Estos valores fueron mayores en la prueba, obteniéndose un MSE de 0.004 9 y un valor R de 0.980 3 (Figura 5b). La RNA fue construida con los dos descriptores moleculares seleccionados como variable de entrada (SpMin7_Bhm, AATSC5s), una capa oculta de 7 neuronas y 1 salida (pIC_{50}). La estructura de la RNA seleccionada se muestra en la Figura 6.

El cribado se realizó con aquellos compuestos con valores predichos de pIC_{50} superiores al

de la acarbosa, lo que sugiere un posible potencial inhibitorio (Tabla 2). Entre esos compuestos destacan diversos ácidos fenólicos y flavonoides, lo que concuerda con estudios previos, que han reportado a dichos compuestos como posibles inhibidores naturales de α -glucosidasa; por ejemplo, el ácido benzoico ha mostrado una inhibición significativa *in vitro* (45 μ M), mientras que flavonoides como el kaemferol (8.9 μ M) y la quercetina (77.4 μ M), han demostrado potencial inhibitorio *in silico* (Guan y col., 2022; Şöhretoğlu y col., 2023). Los resultados mencionados corresponden a la etapa de predicción de actividad (pIC_{50}), previa a las evaluaciones cualitativas y al análisis por acoplamiento molecular indicando una tendencia estructural desde esta fase inicial del análisis. Lo que indica que el uso de herramientas de estimación, como la RNA, podría ser una herramienta valiosa para predecir la bioactividad rápidamente de compuestos no evaluados presentes en los alimentos en la búsqueda de inhibidores naturales de α -glucosidasa. Sin embargo, es necesario complementar esa estimación con análisis de acoplamiento molecular, que permita explorar el comportamiento y la afinidad de los compuestos más prometedores con la enzima.

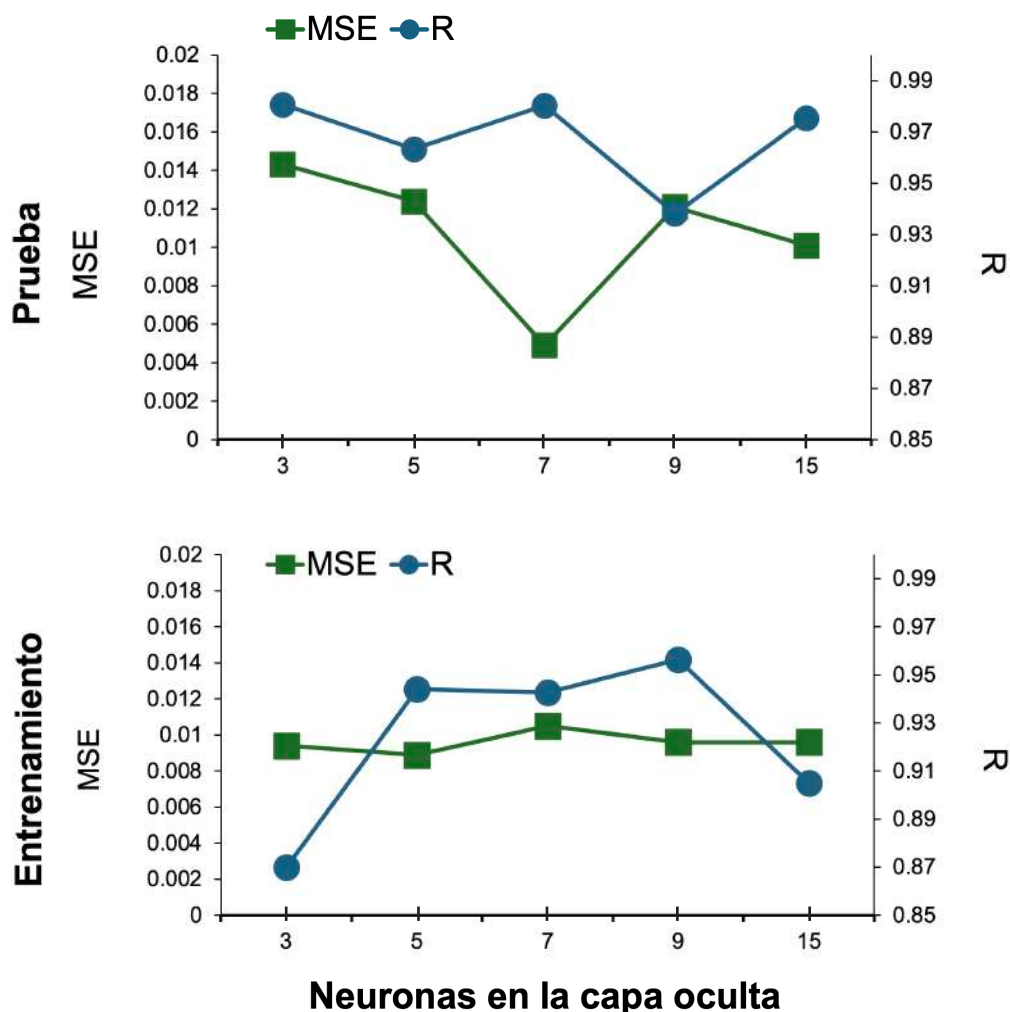
■ Tabla 1. Estimación del pIC_{50} utilizando RNA con diferente número de neuronas en la capa oculta.
Table 1. Estimation of pIC_{50} using ANN with different numbers of neurons in the hidden layer.

Descriptores moleculares		Valores de entrenamiento	Neuronas en la capa oculta				
SpMin7_Bhm	AATSC5s	PIC_{50} (μM)	3	5	7	9	15
1.44	-0.05	-2.12	-2.02	-2.02	-2.02	-2.04	-2.01
1.44	-0.05	-2.01	-2.02	-2.02	-2.02	-2.04	-2.01
1.44	-0.07	-1.94	-2.00	-2.00	-2.00	-2.02	-1.99
1.45	-0.08	-2.06	-1.99	-1.99	-1.99	-2.01	-1.98
1.40	0.00	-2.07	-2.08	-2.10	-2.08	-2.12	-2.08
1.46	-0.05	-1.83	-2.00	-2.01	-2.01	-2.03	-1.99
1.44	-0.04	-1.96	-2.03	-2.04	-2.03	-2.06	-2.02
1.53	-0.07	-2.05	-1.94	-1.93	-1.94	-1.96	-1.91
1.44	-0.03	-1.92	-2.03	-2.04	-2.03	-2.07	-2.02
1.34	-0.07	-1.96	-2.09	-2.10	-2.09	-2.10	-2.10
1.40	-0.13	-1.86	-2.01	-2.00	-2.01	-2.00	-2.00
1.44	-0.08	-1.94	-2.00	-2.00	-2.00	-2.02	-1.99
1.44	-0.09	-1.95	-2.00	-2.00	-2.00	-2.01	-1.99
1.44	-0.10	-2.16	-1.99	-1.99	-1.99	-2.00	-1.98
1.44	-0.07	-1.93	-2.01	-2.01	-2.01	-2.03	-2.00
1.41	-0.06	-1.98	-2.03	-2.04	-2.04	-2.05	-2.03
1.37	-0.06	-2.17	-2.07	-2.08	-2.07	-2.08	-2.07
1.37	-0.13	-2.14	-2.03	-2.03	-2.03	-2.02	-2.03
1.38	-0.12	-1.91	-2.03	-2.03	-2.03	-2.02	-2.03
1.44	-0.12	-2.06	-1.98	-1.98	-1.99	-1.98	-1.97
1.34	-0.03	-2.19	-2.11	-2.13	-2.11	-2.14	-2.12
1.44	-0.10	-1.99	-1.99	-1.99	-1.99	-2.00	-1.98
1.44	-0.04	-2.16	-2.02	-2.03	-2.02	-2.05	-2.02
1.50	-0.06	-2.12	-1.97	-1.97	-1.97	-1.99	-1.95
1.47	-0.03	-2.06	-2.00	-2.01	-2.00	-2.04	-1.99
0.93	0.49	-3.09	-2.94	-3.04	-3.06	-3.06	-3.02
0.95	0.45	-3.01	-2.91	-3.00	-3.02	-3.02	-2.98
0.93	0.29	-2.85	-2.83	-2.87	-2.91	-2.85	-2.89
1.30	0.14	-2.27	-2.28	-2.32	-2.29	-2.36	-2.30
1.52	-0.06	-1.79	-1.95	-1.94	-1.95	-1.97	-1.93

Acoplamiento molecular

Se llevaron a cabo distintas técnicas de acoplamiento molecular para determinar la energía de afinidad entre los compuestos fenólicos (ligandos) cribados de CF-MA y la isomaltasa, aplicadas de forma secuencial. Se seleccionaron los mejores complejos enzima-ligando con puntuación (kcal/mol) para los compuestos de mayor valor estimado de pIC_{50} en comparación con el control acarbosa (Tabla 2).

En el acoplamiento molecular rígido, la naringina exhibió la mayor energía libre de unión (-10.6 kcal/mol), seguida por la quercetina 3,4'-O-diglucósido (-10.4 kcal/mol), superando al control acarbosa (-9.8 kcal/mol) (Tabla 3). Ambos compuestos interactuaron con los aminoácidos del sitio activo (Asp215, Glu277, Asp352) de la α -glucosidasa, indicando una inhibición competitiva. Naringina interactuó con Asp215 mediante un enlace puente de hidrógeno y con



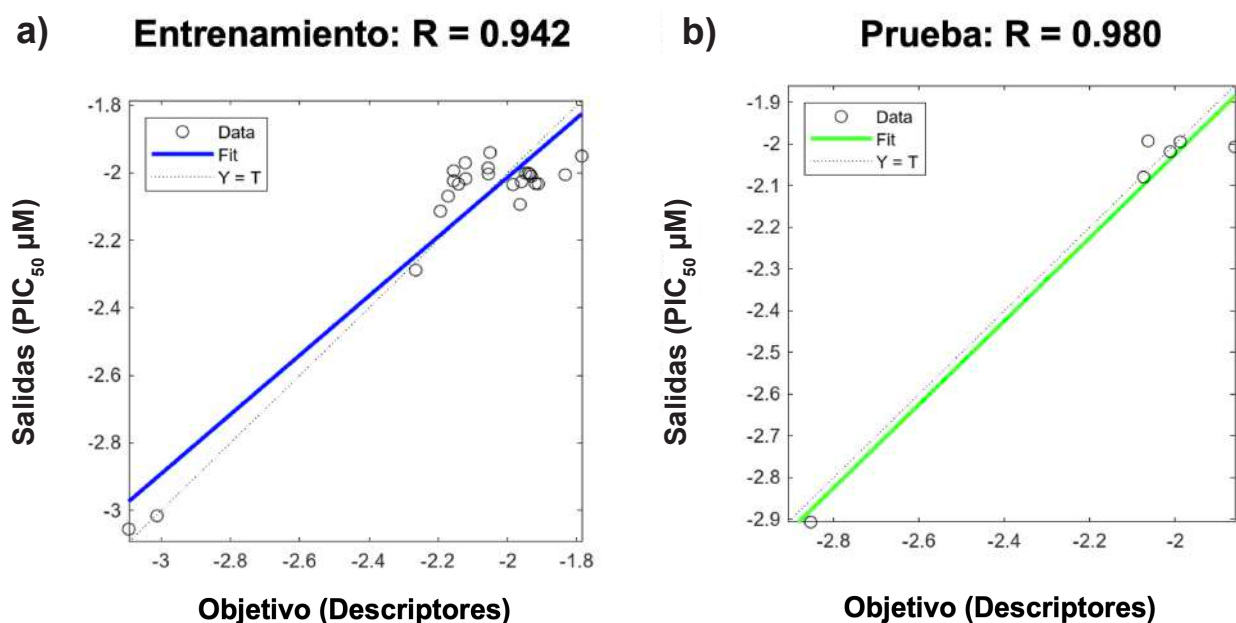
■ Figura 4. Esquema del modelo de RNA con 3 a 15 neuronas en la capa oculta.
Figure 4. Diagram of the ANN model with 3 to 15 neurons in the hidden layer.

Asp352 mediante una interacción Pi-Anión, mientras que la quercetina 3,4'O-diglucósido interactuó con Glu277 y Asp352 mediante puentes de hidrógeno (Figura 7). Las interacciones específicas enzima-ligando de cada uno de los acoplamientos efectuados se detallan en la Tabla 4.

La parte flexible del acoplamiento molecular demostró energías libres de unión, similares a la parte rígida, teniendo como resultado -10.6 kcal/mol con enlaces tipo pi-Anión con el residuo catalítico Asp352, para naringina, y -10.7 kcal/mol con un enlace tipo puente de hidrógeno con Asp352 para la quercetina 3,4'O-diglucósido. No obstante, en ensayo flexible se favorecieron uniones del tipo puente de hidró-

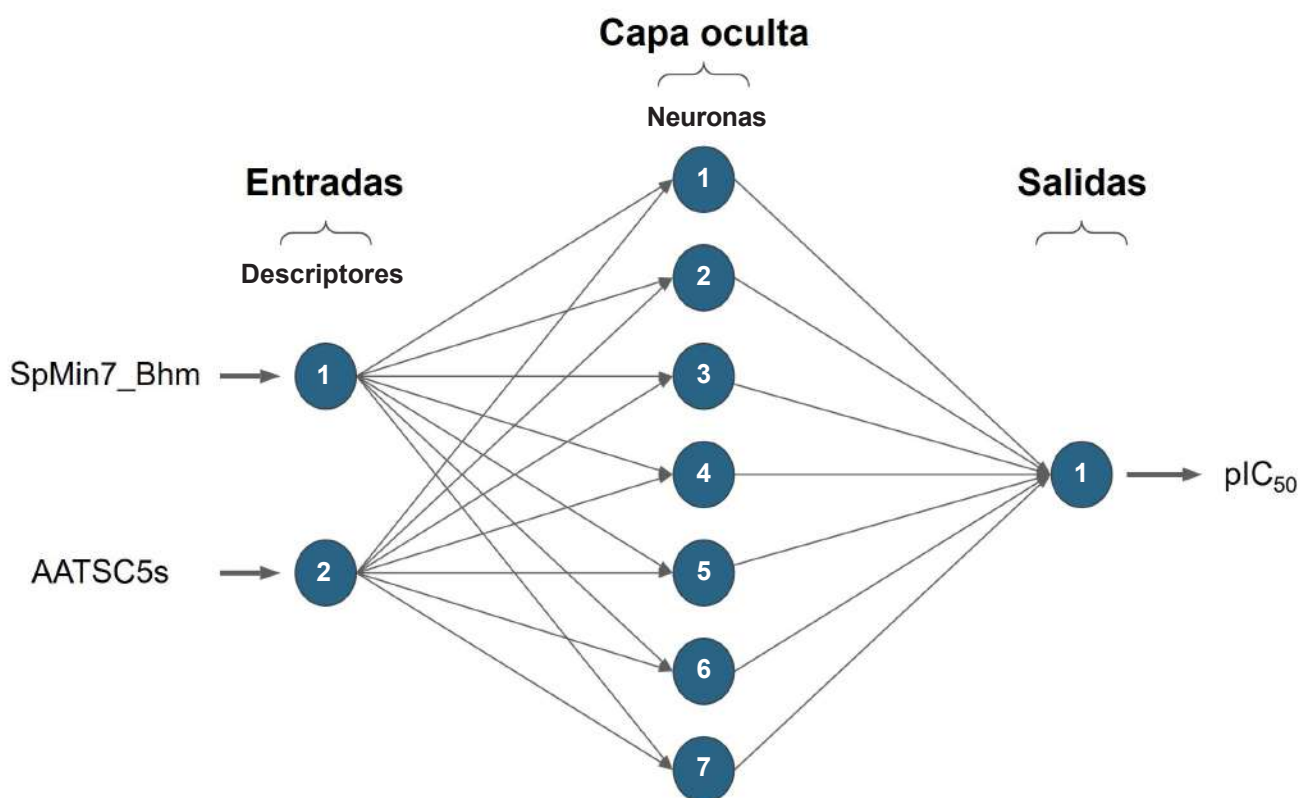
geno con otros residuos en la misma cavidad del sitio catalítico (Tabla 4; Figura 7).

En el acoplamiento 3D, realizado en el software AIDDISON, se observaron ligeras diferencias en las energías de afinidad respecto a los enfoques rígido y flexible, que podría ser atribuible a variaciones en el cálculo de la energía libre propio del software. Naringina presentó una afinidad de -7.64 kcal/mol, interactuando con Asp352 mediante puente de hidrógeno, mientras que la quercetina 3,4'O-diglucósido mostró un valor de -8.7 kcal/mol, interactuando de la misma manera con Asp352. La acarbosa, en este caso, mantuvo una afinidad ligeramente superior (-10 kcal/mol), sin embargo, no formó ningún enlace en el sitio



■ Figura 5. Línea de regresión de (a) entrenamiento y (b) prueba resultantes del modelo de estimación con 7 neuronas.

Figure 5. Regression line for (a) training and (b) testing resulting from the estimation model with 7 neurons.



■ Figura 6. Estructura de la red neuronal seleccionada.

Figure 6. Structure of the selected neural network.

■ Tabla 2. Estimación del pIC_{50} utilizando RNA de diferentes compuestos fenólicos de matrices alimentarias.

Table 2. Estimation of pIC_{50} using ANN for different phenolic compounds from food matrices.

Compuesto fenólico	IC_{50} (μM)	pIC_{50} (μM)	Energías de afinidad (kcal/mol) *
Ácido 2,4-dihidroxibenzoico	67	-1.83	-6
Hesperidina	84	-1.92	-9.3
Tectorigenina 4'-sulfato	85	-1.93	-9.3
Neohesperidina	87	-1.94	-9.7
Trans-resveratrol 3,4'-disulfato	89	-1.95	-9.1
Quercetina 3-O-rutinósido	90	-1.95	-9.8
Oleuropeína	90	-1.96	-8.9
Naringina	91	-1.96	-10.6
Quercetina 3,4'-O-diglucósido	92	-1.96	-10.4
Ácido 2-hidroxibenzoico	94	-1.97	-6
Trans-resveratrol 3,5-disulfato	94	-1.97	-8.7
Tigloilgomicina H	96	-1.98	-7.4
Cianidina 3-O-xilosil-rutinósido	97	-1.99	-10
Schisanhenol	99	-1.99	-8.4
Schisandrina	100	-2	-7.5
Deoxyschisandrina	101	-2	-7.3
Acarbosa	101	-2	-9.8

*Energías de afinidad correspondientes al Docking rígido.

■ Tabla 3. Energías de afinidad obtenidas a partir de distintos métodos de acoplamiento molecular.

Table 3. Affinity energies obtained from different molecular docking methods.

Ligandos	Energías de afinidad (kcal/mol)		
	Acoplamiento molecular (docking)		
	Rígido ¹	Flexible ¹	3D ²
Naringina	-10.6	-10.6	-7.64
Quercetina 3,4'-O-diglucósido	-10.4	-10.7	-8.7
Acarbosa	-9.8	-10.5	-10

¹El valor de energía de afinidad (ΔG) está representado como vina score. ²El valor de ΔG está representado como tal (delta-G).

activo de la enzima, lo que podría indicar un mecanismo de inhibición menos específico (inhibición no competitiva) interactuando solamente en la periferia de la cavidad del sitio activo. Estos resultados muestran que, aunque la energía libre de afinidad es útil, la especificidad y la naturaleza de las interacciones con los residuos catalíticos son determinantes para establecer la actividad inhibitoria real. Por ello, los acoplamientos 3D comple-

mentan y refinan la interpretación obtenida en el acoplamiento rígido y flexible, resaltando la importancia de considerar tanto la magnitud de la afinidad como la calidad de las interacciones al evaluar inhibidores potenciales. Aunque los valores obtenidos para naringina y quercetina 3,4'-O-diglucósido fueron inferiores a los registrados con los otros enfoques, el acoplamiento 3D permite incluir moléculas de agua, así como iones metálicos, además de

■ Tabla 4. Interacciones moleculares entre los mejores ligandos y los residuos aminoacídicos de α -glucosidasa.

Table 4. Molecular interactions between the best ligands and the amino acid residues of α -glucosidase.

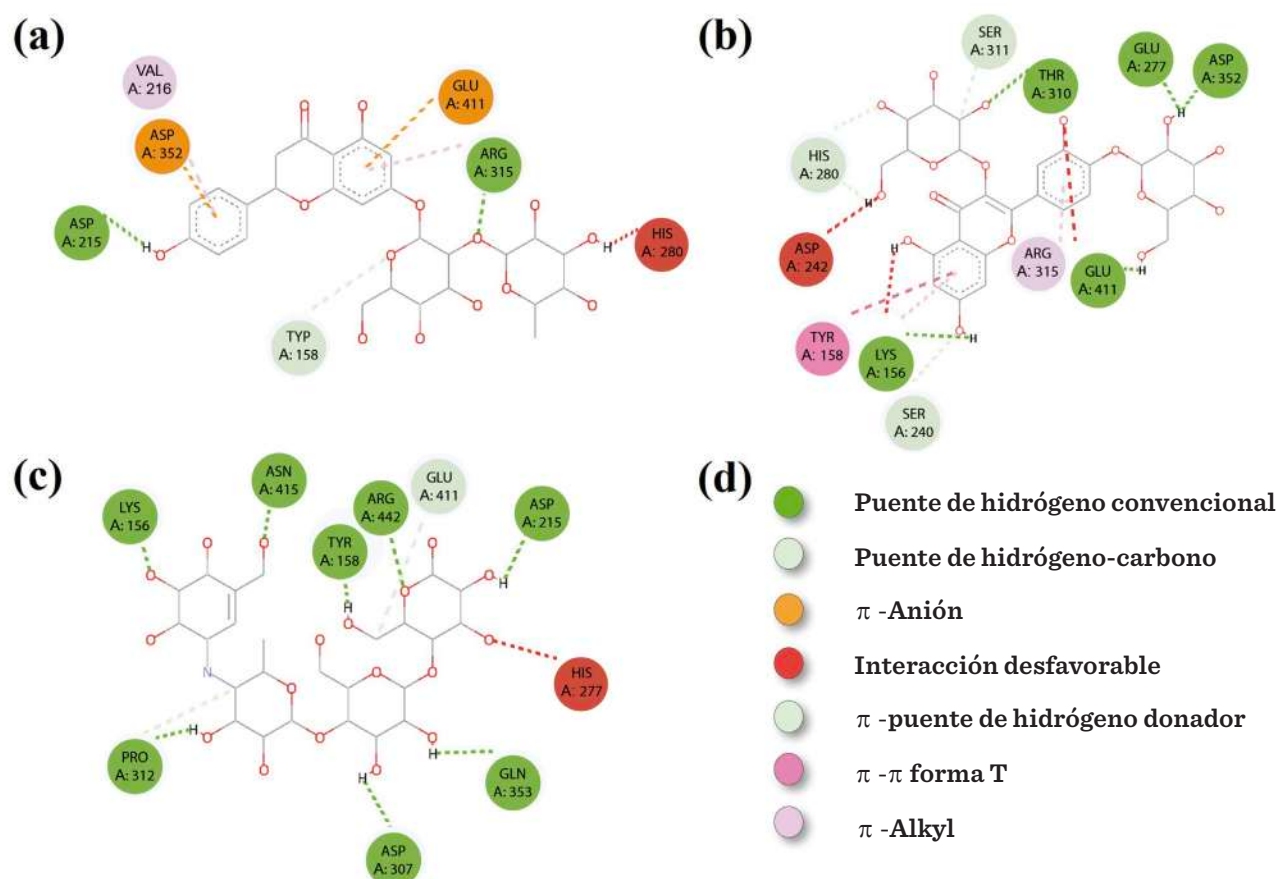
Ligandos	Acoplamiento molecular (docking)					
	Rígido		Flexible		3D	
	PH	OI	PH	OI	PH	OI
Naringina	Asp215* Arg315	Tyr158 (PH-C) Val216 (π -K) His280 (D) Asp352 (π-A)* Glu411 (π -A)	Lys156 His280 Asp307 Arg315	Tyr158 (PH-C)) Val216 (π -K) Asp352 (π-A)* Glu411 (π -A)	Ser240 (1.94) Asp307 (2) Ser311 (2) Pro312 (1.8) Leu313 (2.76) Arg315 (2.1) Asp352 (2.74)* Arg442 (1.9)	Phe314 (3) Pro312 (2.85) ASp242 (2.82)
Quercetina 3,4'-O-diglucósido	Lys156 Glu277* Thr310 Asp352* Glu411	Tyr158 (π - π) Asp242 (D) Ser240 (PH-C) His280 (PH-C) Ser311 (PH-C) Arg315 (π -K)	Tyr158 His280 Leu313 Arg315 Asp352* Glu411 Arg442	Lys156 (π -K) Ser311 (PH-C)	Ser157 (1.78) Ser240 (2.57) Asp242 (2.5) His280 (2.5) Thr310 (1.8) Pro312 (2.3) Asp352 (2.89)* Glu411 (2.38)	Thr310 (2.54) Tyr158 (3.14)
Acarbosa	Lys156 Tyr158 Asp215* Asp307 Pro312 Gln353 Asn415 Arg442	Glu277 (D)* Glu411 (PH-C)	Ser157 Asp215* Arg442	Glu277 (D)* Pro312 (PH-C)	Tyr 158 (1.99) Ala281 (1.89) Asn302 (1.87) Ser304 (2.14) Thr310 (1.73) Pro312 (2.6) Arg315 (2.33) Glu332 (2) Glu411 (1.9) Asn415 (2.93)	His280(2.67) Pro312 (2.78) Arg315 (2.92)

*Aminoácidos correspondientes al sitio activo de la enzima; **PH**: Puente de hidrógeno convencional; **OI**: Otras interacciones; (**PH-C**): Puente de hidrógeno-carbono; (π -**A**): Unión tipo π -Anión; (**D**): Interacción desfavorable; (π -K): Unión tipo π -Alkyl; (π - π): Unión tipo π - π ; (#): Distancias de interacción en Ångströms (Å).

considerar una mayor flexibilidad de la proteína y del ligando, lo que genera un entorno más cercano a las condiciones biológicas reales. Por ello, a pesar de que las energías calculadas sean ligeramente menores, este enfoque podría ofrecer predicciones más representativas de las interacciones enzimáticas efectivas.

El acoplamiento rígido permitió realizar un análisis más rápido, lo que lo vuelve un procedimiento muy eficiente para un primer filtro de compuestos, ya que tanto el ligando como el sitio activo de la enzima permanecen en conformaciones fijas, reduciendo el espacio de búsqueda y el costo computacional. Por

su parte, el docking flexible permitió evaluar con mayor precisión las conformaciones de las estructuras más prometedoras, debido a que se posibilitan torsiones en la estructura del ligando y de ciertos residuos del sitio activo, lo que mejora la predicción de la interacción, aunque implica un mayor tiempo de cálculo y consumo de recursos computacionales. La combinación de ambos análisis mejora la rapidez inicial, mediante predicción de la afinidad de unión y la caracterización de las interacciones moleculares, proporcionando resultados más realistas y biológicamente relevantes (Rosenfeld y col., 1995; Nirwan y col., 2022).



■ Figura 7. Interacciones entre CF-MA y la enzima α -glucosidasa correspondientes al acoplamiento rígido. (a) Naringina; (b) Quercetina 3,4'-O-diglucósido; (c) Acarbosa; (d) Tipo de interacción.

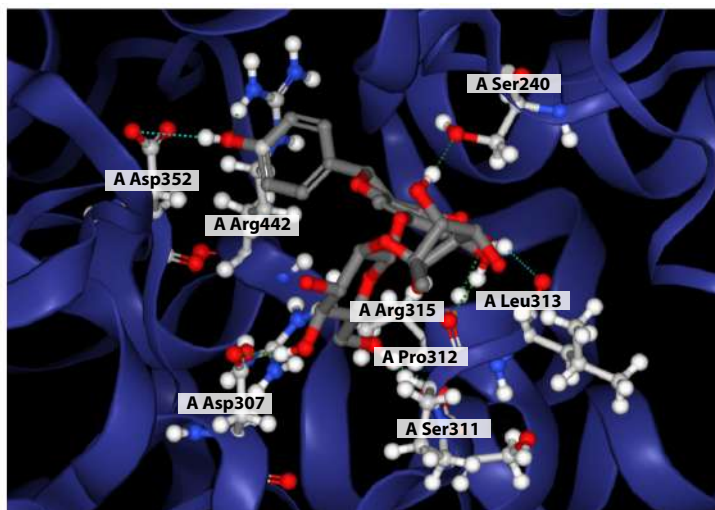
Figure 7. Interactions between CF-MA and the α -glucosidase enzyme corresponding to rigid docking. (a) Naringin; (b) Quercetin 3,4'-O-diglucoside; (c) Acarbose; (d) Type of interaction.

El software de Sigma-Aldrich, AIDDISON™, versión 24.0.5.0; empleado permitió visualizar los resultados obtenidos, directamente en la estructura cristalina de la enzima, mostrando cómo el ligando se une al sitio activo (Figura 8). Mediante esta visualización 3D no solo es posible confirmar la localización de los ligandos dentro o fuera del sitio activo y sus distancias, sino también examinar cómo factores espaciales afectan la estabilidad de la interacción, aportando así un enfoque complementario y más realista para la evaluación de potenciales inhibidores (Rusinko y col., 2024). La naringina y la quercetina 3,4'-O-diglucósido fueron los compuestos más destacados, mostrando afinidades elevadas y múltiples interacciones en todos los análisis de acoplamiento realizados. Este tipo de resultados permiten

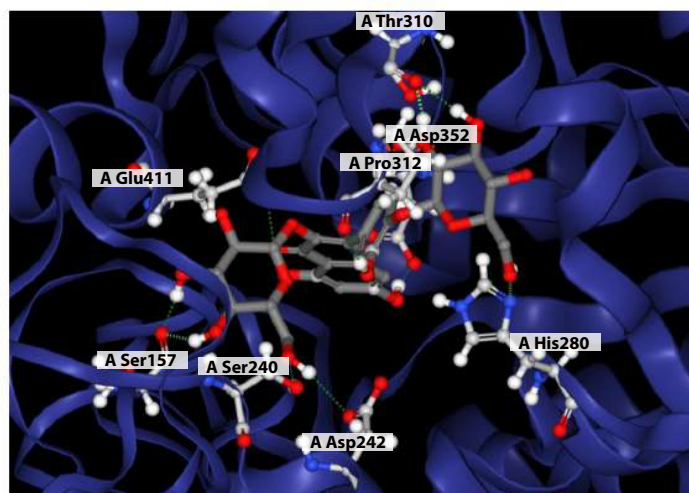
establecer posibles comparaciones con resultados experimentales previamente reportados en la literatura. Por ejemplo, se ha documentado que la naringina presenta una alta inhibición contra la enzima α -glucosidasa humana *in vitro* ($IC_{50} = 0.55 \mu M$) y un mayor número de interacciones del tipo puente de hidrógeno en el ensayo *in silico* (11 enlaces), en comparación con la acarbose ($IC_{50} = 108 \mu M$ y 9 enlaces) (Sahnoun y col., 2017). De forma complementaria, otro estudio reportó un IC_{50} de 0.174 mmol/L para la naringina (174 μM) con una energía de unión de -7.6 kJ/mol, superando a los 0.721 mmol/L de acarbose (721 μM) (Xiangju y col., 2022).

Los resultados obtenidos en el presente estudio indicaron que, se estimó un IC_{50} de 91 μM

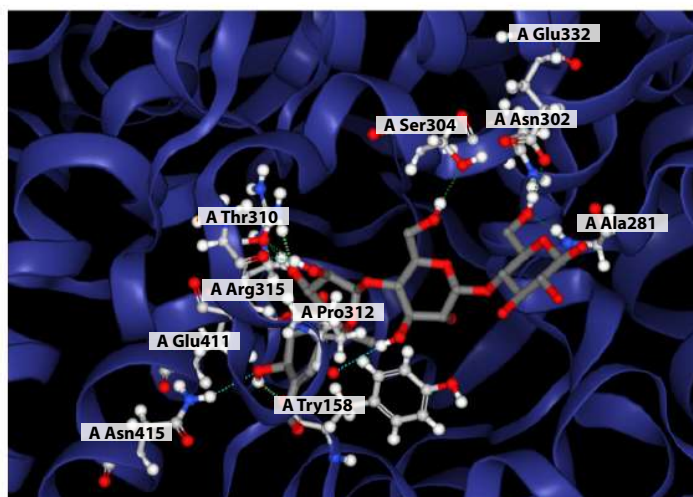
(a)



(b)



(c)



■ Figura 8. Acoplamiento molecular 3D entre CF-MA y la enzima α -glucosidasa. (a) Naringina; (b) Quercetina 3,4'-O-diglucósido; (c) Acarbosa.

Figure 8. 3D molecular docking between CF-MA and the α -glucosidase enzyme. (a) Naringin; (b) Quercetin 3,4'-O-diglucoside; (c) Acarbose.

para la naringina y 101 μM para la acarbo-
sa, utilizando datos de α -glucosidasa microbia-
na. Esta diferencia en la inhibición podría de-
berse al tipo de enzima empleada y al carác-
ter estimativo del modelo QSAR, cuyo ob-
jetivo es facilitar la identificación temprana
de compuestos con potencial terapéutico, ace-
lerando la selección de candidatos antes de
ensayos experimentales. Aun así, los resulta-
dos reflejan correctamente la tendencia ob-
servada en la literatura y respaldan el poten-
cial de la naringina como inhibidor de la α -glu-
cosidasa.

En el caso de la quercetina 3,4'-O-diglucósido,
estudios previos reportan una actividad inhi-
bidora menor frente a la α -glucosidasa, con
un valor IC_{50} de 30.3 $\mu\text{g/mL}$ (48.4 μM), mien-
tras que la acarbo-osa mostró una mayor inhi-
bición con un IC_{50} de 10.1 $\mu\text{g/mL}$ (15.6 μM) (Ni-
le y col., 2021). En contraste con los resulta-
dos obtenidos en el presente estudio, el valor
de IC_{50} predicho de la quercetina 3,4'-O-diglucó-
sido (92 μM) fue superior al de acarbo-osa
(101 μM), lo que contradice los datos experi-
mentales disponibles. Esta discrepancia puede
atribuirse a las diferencias entre los métodos
in silico e *in vitro*, ya que los primeros de-
penden del conjunto de datos y la parametri-
zación del modelo, mientras que los segundos
están condicionados por la fuente enzimáti-
ca, el pH y el medio de reacción empleados.
Aun así, la tendencia general de las prediccio-
nes concuerda con los comportamientos re-
lativos observados para otros flavonoides co-
mo el kaemferol (Şöhretoğlu y col., 2023), lo
que respalda la capacidad del modelo como he-
rramienta estimativa útil en el cribado y selec-
ción de inhibidores potenciales.

Los resultados obtenidos mediante la RNA
permitieron predecir los compuestos con ma-
yor probabilidad de inhibir la enzima, mien-
tras que el acoplamiento molecular validó es-
tructuralmente dichas predicciones al mostrar
interacciones estables en el sitio activo. De
este modo, ambos enfoques se complementan,
integrando la predicción cuantitativa de la RNA
con la confirmación estructural del docking.

Algunos autores reportan una relación posi-
tiva entre los ensayos de acoplamiento molecu-
lar y los ensayos *in vitro* (Tolmie y col., 2021;
Mehmood y col., 2022) y han enfatizado la
importancia de los ensayos *in silico* para esti-
mar la inhibición enzimática, especialmente
para la evaluación de nuevas moléculas antes
de los ensayos *in vitro* e *in vivo*. Esto respal-
da el enfoque adoptado en el presente trabajo,
donde las predicciones *in silico* no solo ofre-
cieron resultados coherentes con la literatura,
sino que también permitieron identificar com-
puestos prometedores para futuros estudios
experimentales. Cabe destacar que la combina-
ción de datos de Phenol-Explorer y ChEMBL
constituye un aspecto innovador del estudio,
al integrar información estructural y bioacti-
va de compuestos fenólicos, fortaleciendo la
capacidad predictiva del modelo y su aplicabi-
lidad en la identificación de nuevos inhibido-
res de α -glucosidasa. Aunque los compuestos
identificados ya se habían reportado como in-
hibidores de α -glucosidasa, la aportación prin-
cipal es la validación de un enfoque eficiente
y adaptable a otros sistemas enzimáticos, ca-
paz de priorizar compuestos con alto potencial
bioactivo y reducir el tiempo y recursos ne-
cesarios para la evaluación experimental.

CONCLUSIONES

La RNA desarrollada, configurada con siete
neuronas en la capa oculta e implementando
los descriptores SpMin7_Bhm y AATSC5s co-
mo variables de entrada, demostró una eleva-
da capacidad predictiva para estimar la ac-
tividad inhibidora frente a la enzima α -gluco-
sidasa (isomaltosa) ($R = 0.9803$). La selección
de estos descriptores constituye una contribu-
ción técnica relevante, al evidenciar su efica-
cia para modelar la inhibición en comparación
con descriptores comúnmente empleados co-
mo LogP o MR. Además, el uso de análisis de
correlación de Pearson, componentes principa-
les y conglomerados permitió reducir los 1 444
descriptores iniciales a dos, de manera riguro-
sa y bien justificada, minimizando la multicoli-
nearidad y maximizando la representatividad de
los datos. La combinación del modelado QSAR
mediante RNA y los análisis de acoplamiento

molecular representa un aporte significativo a la quimioinformática aplicada, al proporcionar un enfoque dual para predecir y validar la actividad biológica de compuestos fenólicos, reduciendo la necesidad de ensayos experimentales preliminares y orientando de manera más eficiente la búsqueda de nuevos inhibidores naturales de α -glucosidasa. Entre los compuestos evaluados, la naringina y la quercetina 3,4'-O-diglucósido destacaron como los candidatos más prometedores, al presentar afinidades superiores a las de la acarbosa tanto en las predicciones del modelo como en los análisis de docking (rígido, flexible y 3D), lo que refuerza su potencial como inhibidores de interés far-

macológico. El presente diseño metodológico integra herramientas estadísticas y computacionales de forma estructurada, con lo que demuestra la capacidad del enfoque QSAR-RNA-Docking para filtrar compuestos bioactivos de manera eficiente. Es necesario corroborar experimentalmente los resultados obtenidos por este método y ampliar la base de datos con nuevos compuestos y descriptores, a fin de fortalecer la robustez y generalización del modelo.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declararon no tener conflictos de intereses de ningún tipo.

REFERENCIAS

- Alongi, M., Frías-Celayeta, J. M., Vríz, R., Kinse-lla, G. K., Rulikowska, A., & Anese, M. (2021). *In vitro* digestion nullified the differences triggered by roasting in phenolic composition and α -glucosidase inhibitory capacity of coffee. *Food Chemistry*, 342, 128289. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128289>
- Burden, F. R. (1989). Molecular identification number for substructure searches. *Journal of Chemical Information and Computer Sciences*, 29(3), 225-227. <https://doi.org/10.1021/ci00063a011>
- Chapman, J., Truong, V. K., & Cozzolino, D. (2022). *Artificial intelligence applied to healthcare and biotechnology*. In D. Barh (Ed.), *Biotechnology in Healthcare: Technologies and Innovations* (pp. 249- 257). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89837-9.00001-2>
- Chen, J. G., Wu, S. F., Zhang, Q. F., Yin, Z. P., & Zhang, L. (2020). α -Glucosidase inhibitory effect of anthocyanins from *Cinnamomum camphora* fruit: Inhibition kinetics and mechanistic insights through *in vitro* and *in silico* studies. *International Journal of Biological Macromolecules*, 143, 696-703. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.09.091>
- Cherkasov, A., Muratov, E. N., Fourches, D., Varnek, A., Baskin, I. I., Cronin, M., Dearden, J., Gramatica, P., Martin, Y. C., Todeschini, R., Consonni, V., Kuz'Min, V. E., Cramer, R., Benigni, R., Yang, C., Rathman, J., Terfloth, L., Gasteiger, J., Richard, A., & Tropsha, A. (2014). QSAR modeling: Where have you been? Where are you going to? *Journal of Medicinal Chemistry*, 57(12), 4977-5010. <https://doi.org/10.1021/jm4004285>
- Daoui, O., Mkhayar, K., Elkhatabi, S., Chtita, S., Zgou, H., & Elkhlabi, R. (2022). Design of novel carbocycle-fused quinoline derivatives as potential inhibitors of lymphoblastic leukemia cell line MOLT-3 using 2D-QSAR and ADME-Tox studies. *RHAZES: Green and Applied Chemistry*, 14(0), 36-61. <https://doi.org/10.48419/IMIST.PRSM/RHAZES-V14.31152>
- Doungwichitrkul, T., Damsud, T., & Phuwapraisirisan, P. (2024). α -Glucosidase Inhibitors from Cold-Pressed Black Sesame (*Sesamum indicum*) Meal: Characterization of New Furofuran Lignans, Kinetic Study, and In Vitro Gastrointestinal Digestion. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 72(2), 1044-1054. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c04159>
- El-fadili, M., Er-rajj, M., Imtara, H., Noman, O. M., Mothana, R. A., Abdullah, S., Zerougui, S., & Elhal-laoui, M. (2023). QSAR, ADME-Tox, molecular docking and molecular dynamics simulations of novel selective glycine transporter type 1 inhibitors with memory enhancing properties. *Heliyon*, 9(2), e13706. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13706>
- Emonts, J. & Buyel, J. F. (2023). An overview of descriptors to capture protein properties – Tools and perspectives in the context of QSAR modeling. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 21, 3234-3247. <https://doi.org/10.1016/J.CSBJ.2023.05.022>
- European Bioinformatics Institute (2025). Base de datos ChEMBL. [En línea]. Disponible en: <https://>

www.ebi.ac.uk/chembl/. Fecha de consulta: 15 de marzo de 2025.

Gálvez, J., Garcia, R., Salabert, M. T., & Soler, R. (2002). Charge Indexes. New Topological Descriptors. *Journal of Chemical Information and Computer Sciences*, 34(3), 520–525. <https://doi.org/10.1021/CIO0019A008>

Guan, L., Long, H., Ren, F., Li, Y., & Zhang, H. (2022). A Structure—Activity Relationship Study of the Inhibition of α -Amylase by Benzoic Acid and Its Derivatives. *Nutrients*, 14(9), 1931. <https://doi.org/10.3390/NU14091931/S1>

Gupta, R., Srivastava, D., Sahu, M., Tiwari, S., Ambasta, R. K., & Kumar, P. (2021). Artificial intelligence to deep learning: machine intelligence approach for drug discovery. *Molecular Diversity*, 25(3), 1315–1360. <https://doi.org/10.1007/s11030-021-10217-3>

Hossain, U., Das, A. K., Ghosh, S., & Sil, P. C. (2020). An overview on the role of bioactive α -glucosidase inhibitors in ameliorating diabetic complications. *Food and Chemical Toxicology*, 145, 111738. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2020.111738>

Hung, C. & Gini, G. (2021). QSAR modeling without descriptors using graph convolutional neural networks: the case of mutagenicity prediction. *Molecular Diversity*, 25(3), 1283–1299. <https://doi.org/10.1007/s11030-021-10250-2>

Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., & Suman, R. (2022). Artificial Intelligence Applications for Industry 4.0: A Literature-Based Study. *Journal of Industrial Integration and Management*, 7(1), 83–111. <https://doi.org/10.1142/S2424862221300040>

Manach, C., Scalbert, A., Morand, C., Rémésy, C., & Jiménez, L. (2004). Polyphenols: food sources and bioavailability. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 79(5), 727–747. <https://doi.org/10.1093/AJCN/79.5.727>

Mehmood, R., Mughal, E. U., Elkaeed, E. B., Obaid, R. J., Nazir, Y., Al-Ghulikah, H. A., Al-Ghulikah, H., Naeem, N., Munirah M. Al-Rooqi, Ahmed, S. A., Wadood-Shah, A. S., & Sadiq, A. (2022). Synthesis of Novel 2,3-Dihydro-1,5-Benzothiazepines as α -Glucosidase Inhibitors: In Vitro, In Vivo, Kinetic, SAR, Molecular Docking, and QSAR Studies. *ACS Omega*, 7(34), 30215–30232. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c03328>

Minitab Support. (2023). *Interpretar todos los estadísticos y gráficas para Correlación*. Minitab. [En línea]. Disponible en: [\[mx/minitab/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/how-to/correlation/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/\]\(https://support.minitab.com/es-mx/minitab/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/how-to/correlation/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/\) Fecha de consulta: 16 de octubre de 2025.](https://support.minitab.com/es-</p>
</div>
<div data-bbox=)

National Library of Medicine (2025). PubChem. [En línea]. Disponible en: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov>. Fecha de consulta: 15 de marzo de 2025.

Neveu, V., Perez-Jiménez, J., Vos, F., Crespy, V., du-Chaffaut, L., Mennen, L., Knox, C., Eisner, R., Cruz, J., Wishart, D., & Scalbert, A. (2010). Phenol-Explorer: an online comprehensive database on polyphenol contents in foods. Database: *The Journal of Biological Databases and Curation*, 2010. <https://doi.org/10.1093/DATABASE/BAP024>

Nile, A., Gansukh, E., Park, G. S., Kim, D. H., & Nile, S. H. (2021). Novel insights on the multi-functional properties of flavonol glucosides from red onion (*Allium cepa* L) solid waste – In vitro and in silico approach. *Food Chemistry*, 335, 127650. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2020.127650>

Nirwan, S., Chahal, V., & Kakkar, R. (2022). A comparative study of different docking methodologies to assess the protein-ligand interaction for the E. coli MurB enzyme. *Journal of Biomolecular Structure & Dynamics*, 40(21), 11229–11238. <https://doi.org/10.1080/07391102.2021.1957019>

Patra, J. C. & Chua, K. H. K. (2010). Neural network based drug design for diabetes mellitus using QSAR with 2D and 3D descriptors. *The 2010 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2010.5596935>

Phenol-Explorer (2025). Base de datos sobre compuestos fenólicos en alimentos. [En línea]. Disponible en: <http://phenol-explorer.eu/>. Fecha de consulta: 16 de marzo de 2025.

Pinzi, L. & Rastelli, G. (2019). Molecular Docking: Shifting Paradigms in Drug Discovery. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(18), 4331. <https://doi.org/10.3390/ijms20184331>

Poovitha, S., & Parani, M. (2016). In vitro and in vivo α -amylase and α -glucosidase inhibiting activities of the protein extracts from two varieties of bitter melon (*Momordica charantia* L.). *BMC Complementary and Alternative Medicine*, 16(S1), 185. <https://doi.org/10.1186/s12906-016-1085-1>

RCSB Protein Data Bank (2025). Banco de Datos de Proteínas RCSB. [En línea]. Disponible en: <https://www.rcsb.org>. Fecha de consulta: 15 de marzo de 2025.

2025.

Rosenfeld, R., Vajda, S., & DeLisi, C. (1995). Flexible docking and design. *Annual Review of Biophysics and Biomolecular Structure*, 24(1), 677-700. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV.BB.24.060195.003333/CITE/REFWORKS>

Rothwell, J. A., Perez-Jimenez, J., Neveu, V., Medina-Remón, A., M'Hiri, N., García-Lobato, P., Manach, C., Knox, C., Eisner, R., Wishart, D. S., & Scalbert, A. (2013). Phenol-Explorer 3.0: a major update of the Phenol-Explorer database to incorporate data on the effects of food processing on polyphenol content. *Database*, 2013. <https://doi.org/10.1093/DATABASE/BAT070>

Rusinko, A., Rezaei, M., Friedrich, L., Buchstaller, H. P., Kuhn, D., & Ghogare, A. (2024). AIDDISON: Empowering Drug Discovery with AI/ML and CADD Tools in a Secure, Web-Based SaaS Platform. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 64(1), 3-8. <https://doi.org/10.1021/acs.jcim.3c01016>

Sahnoun, M., Trabelsi, S., & Bejar, S. (2017). Citrus flavonoids collectively dominate the α -amylase and α -glucosidase inhibitions. *Biologia (Poland)*, 72(7), 764-773. <https://doi.org/10.1515/biolog-2017-0091>

Sim, L., Willemsma, C., Mohan, S., Naim, H. Y., Pinto, B. M., & Rose, D. R. (2010). Structural Basis for Substrate Selectivity in Human Maltase-Glucoamylase and Sucrase-Isomaltase N-terminal Domains. *The Journal of Biological Chemistry*, 285(23), 17763. <https://doi.org/10.1074/JBC.M109.078980>

Salazar-López, N. J., López-Rodríguez, C. V., Hernández-Montoya, D. A., & Campos-Vega, R. (2020). Health Benefits of Spent Coffee Grounds. In *Food Wastes and By-products*, 327-351. <https://doi.org/10.1002/9781119534167.ch11>

Simeon, S. & Jongkon, N. (2019). Construction of Quantitative Structure Activity Relationship (QSAR) Models to Predict Potency of Structurally Diversed Janus Kinase 2 Inhibitors. *Molecules* 24(23), 4393 <https://doi.org/10.3390/MOLECULES24234393>

Singh, P., Kumar, R., Sharma, B. K., & Prabhakar, Y. S. (2009). Topological descriptors in modeling malonyl coenzyme A decarboxylase inhibitory activity: N-Alkyl-N-(1,1,1,3,3,3-hexafluoro-2-hydroxypropylphenyl) amide derivatives. *Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry*, 24(1), 77-85. <https://doi.org/10.1080/14756360801915336>

Şöhretoğlu, D., Renda, G., Arroo, R., Xiao, J., & Sari,

S. (2023). Advances in the natural α -glucosidase inhibitors. *EFood*, 4(5). <https://doi.org/10.1002/efd2.112>

Taiwo, A. E., Okoji, A. I., Eloka-Eboka, A. C., & Musonge, P. (2022). The role of artificial neural networks in bioproduct development: a case of modeling and optimization studies. *Current Trends and Advances in Computer-Aided Intelligent Environmental Data Engineering*, 417-431. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85597-6.00007-0>

Todeschini, R. & Consonni, V. (2009). Molecular Descriptors for Chemoinformatics: Volume I: Alphabetical Listing (Second edition). Wiley-VCH.

Tolmie, M., Bester, M. J., & Apostolides, Z. (2021). Inhibition of α -glucosidase and α -amylase by herbal compounds for the treatment of type 2 diabetes: A validation of in silico reverse docking with in vitro enzyme assays. *Journal of Diabetes*, 13(10), 779-791. <https://doi.org/10.1111/1753-0407.13163>

Tropsha, A. (2010). Best Practices for QSAR Model Development, Validation, and Exploitation. *Molecular Informatics*, 29(6-7), 476-488. <https://doi.org/10.1002/MINF.201000061>

Wang, Z., Li, S., Ge, S., & Lin, S. (2020). Review of Distribution, Extraction Methods, and Health Benefits of Bound Phenolics in Food Plants. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(11), 3330-3343. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b06574>

Xiangju, Z., Yuqin, C., Zhongping, Y., Qi, L., Jianwei, Z., Daobang, T., Jiguang, C., Xiangju, Z., Yuqin, C., Zhongping, Y., Qi, L., Jianwei, Z., Daobang, T., & Jiguang, C. (2022). Inhibitory Effect of Naringin on α -Glucosidase and Its Mechanism. *Science and Technology of Food Industry*, 43(8), 157-164. <https://doi.org/10.13386/J.ISSN1002-0306.2021080184>

Xu, Y. (2022). Deep neural networks for QSAR. In A. Heifetz (Ed.), *Artificial intelligence in drug design* (pp. 233-260). Humana. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1787-8_10

Yamamoto, K., Miyake, H., Kusunoki, M., & Osaka, S. (2010). Crystal structures of isomaltase from *Saccharomyces cerevisiae* and in complex with its competitive inhibitor maltose. *FEBS Journal*, 277(20), 4205-4214. <https://doi.org/10.1111/j.1742-4658.2010.07810.x>

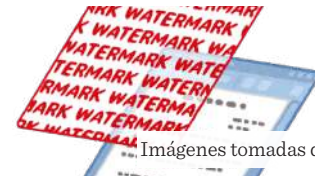
Yap, C. W. (2011). PaDEL-descriptor: An open source software to calculate molecular descriptors and fingerprints. *Journal of Computational Chemistry*, 32(7), 1466-1474. <https://doi.org/10.1002/JCC.21707>

Yoshikawa, T., Mifune, Y., Inui, A., Nishimoto, H., Yamaura, K., Mukohara, S., Shinohara, I., & Kuroda, R. (2022). Quercetin treatment protects the Achilles tendons of rats from oxidative stress induced by hyperglycemia. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 23 (1), 563. <https://doi.org/10.1186/s12891-02205513-4>

Yue, L. M., Lee, J., Zheng, L., Park, Y. D., Ye, Z. M., & Yang, J. M. (2017). Computational prediction integrating the inhibition kinetics of gallotanin on α -glucosidase. *International Journal of Biological Macromolecules*, 103, 829-838. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.05.106>

Zdrzil, B., Felix, E., Hunter, F., Manners, E. J., Blackshaw, J., Corbett, S., de-Veij, M., Ioannidis, H., Lopez, D. M., Mosquera, J. F., Magarinos, M. P., Bosc, N., Arcila, R., Kizilören, T., Gaulton, A., Bento, A. P., Adasme, M. F., Monecke, P., Landrum, G. A., & Leach, A. R. (2024). The ChEMBL Database in 2023: a drug discovery platform spanning multiple bioactivity data types and time periods. *Nucleic Acids Research*, 52(D1), D1180-D1192. <https://doi.org/10.1093/NAR/GKAD1004>

Zerroug, E., Belaidi, S., & Chtita, S. (2021). Artificial neural network-based quantitative structure-activity relationships model and molecular docking for virtual screening of novel potent acetylcholinesterase inhibitors. *Journal of the Chinese Chemical Society*, 68(8), 1379-1399. <https://doi.org/10.1002/jccs.202000457>



Imágenes tomadas de Canva educativo

Algoritmo de marcado de agua robusto: autenticación de imágenes mediante redes neuronales siamesas y características híbridas espacio-frecuencia

Robust zero-watermarking algorithm for image authentication using hybrid spatial-frequency features and siamese neural networks

Rodrigo Eduardo Arevalo-Ancona, Eduardo Fragozo-Navarro, Manuel Cedillo-Hernández*

RESUMEN

El uso y distribución de archivos digitales, impulsado por los avances en las tecnologías de la información, ha generado la necesidad de desarrollar sistemas para la protección de los derechos de autor. En el contexto de las imágenes digitales, es fundamental minimizar los riesgos de seguridad asociados con la distribución no autorizada y garantizar la integridad de la información visual. El objetivo de este trabajo fue desarrollar un algoritmo de marcado de agua libre de distorsiones, diseñado para la autenticación de la propiedad del usuario y la recuperación de imágenes originales en escala de grises en caso de su manipulación. El método propuesto utilizó una red neuronal siamesa con una arquitectura de dos ramas: una que aprende características frecuenciales a partir de los coeficientes de la transformada de wavelet discreta y otra que extrae características espaciales de la otra imagen. Adicionalmente, se integró una red neuronal entrenada con características espaciales para reconstruir una versión en escala de grises de la imagen original, natural a color, tras una manipulación. El método propuesto demostró su eficacia en los tiempos de procesamiento, precisión y proceso de recuperación de la marca de agua para la verificación de la propiedad del usuario y la autenticación de imágenes manipuladas. Destacando sus mejoras de robustez, frente a distorsiones geométricas como rotación, traslación, transformación, afín, recorte y escalado, así como la combinación de algunas distorsiones. El autoencoder entrenado conserva una alta fidelidad en la reconstrucción de imágenes en escala de grises, alteradas por manipulaciones combinadas con otras distorsiones, por lo que demostró ser una solución eficaz para la autenticación y protección de los derechos de autor en imágenes digitales.

PALABRAS CLAVE: marcado de agua libre de distorsiones, aprendizaje profundo, red neuronal siamesa, autenticación de propietario, seguridad en imágenes.

ABSTRACT

The use and distribution of digital files has increased due to advancements in information technologies. This has created the need for the development of copyright protection systems. In the context of digital images, it is essential to minimize security risks associated with unauthorized distribution and ensure the integrity of visual information. The objective of this paper was to develop a robust zero-watermarking algorithm designed for user ownership verification and the recovery of original images in grayscale in cases of manipulation. The proposed method employed a Siamese neural network with a architecture model consisted of two branches: one learns frequency-domain features from discrete wavelet transform coefficients, and other that extract spatial features from the other image. Additionally, a neural network trained with spatial features was used to reconstruct a grayscale version of the original image after tampering. The proposed method proved its using natural color images demonstrated the high effectiveness in processing times, precision and of the watermark recovery process for verifying user ownership and accurately authenticating manipulated images. Highlighted its improvements robustness when encountering geometrical distortions such as rotation, translation, transformation, affine, clipping and scaling, as well as the combination of some distortions. The trained autoencoder preserves high fidelity in grayscale image reconstruction that has suffered alterations by combining manipulations with other distortions. The proposed algorithm proved to be an effective solution for the authentication and protection of copyright in digital images.

KEYWORDS: zero-watermarking, deep learning, siamese neural network, ownership authentication, image security.

*Correspondencia: mcedilloh@ipn.mx/ Fecha de recepción: 17 de enero de 2025/ Fecha de aceptación: 27 de junio de 2025/ Fecha de publicación: 18 de agosto de 2025.

Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Culhuacán, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, avenida Sta. Ana, núm. 1000, San Francisco Culhuacán, Culhuacán CTM V, Coyoacán, Ciudad de México, México, C. P. 04440.

INTRODUCCIÓN

Los avances recientes en las tecnologías de la información han provocado un notable aumento en la creación y distribución de archivos digitales, especialmente imágenes digitales (Ikbal y Gopikakamari, 2022). Esta creciente demanda ha generado la necesidad de desarrollar soluciones eficaces para proteger, preservar y verificar la autenticidad de las imágenes (Shamia y col., 2023). Por esta razón, se han desarrollado técnicas de marcado de agua para proteger las imágenes digitales y evitar falsificaciones o usos no autorizados (Ami ni y col., 2018; Wu y col., 2020).

Las marcas de agua utilizadas contienen información derivada de la imagen o del propietario, permitiendo identificar su propiedad (Lee y col., 2019; Liu y col., 2020; Shang y col., 2023). Las metodologías convencionales insertan una señal en la imagen para proteger su propiedad intelectual, pero generan distorsiones que afectan su calidad visual (Gong y col., 2022). Para solucionar esta limitación, se han desarrollado algoritmos de marcado de agua libre de distorsiones.

Los métodos libres de distorsiones emplean un componente adicional, el código de usuario, que permite autenticar la imagen sin modificarla ni comprometer su calidad visual. Este código se almacena y se genera asociando características de la imagen con una marca de agua binaria mediante una operación lógica (Liu y Zhang, 2021). Durante la autenticación, el código de usuario se combina con las características de la imagen, para recuperar la marca de agua, garantizando la autenticación de la propiedad (Dong y col., 2023b; Khafaga y col., 2023).

Zhang (2021) presentó un sistema libre de distorsiones utilizando el coeficiente DC de la transformada discreta del coseno (DCT, por sus siglas en inglés: discrete cosine transform) para generar una matriz de características. El uso de características frecuenciales (asociadas con la distribución de la intensidad de píxeles) mejora la robustez del sistema ante dis-

torsiones geométricas. Posteriormente, utiliza el algoritmo de descomposición en valores singulares (SVD, por sus siglas en inglés: singular vector decomposition), para extraer las características de la imagen. Este método garantiza la extracción de características robustas. Li y col. (2023b) propusieron un algoritmo para imágenes médicas, combinando los algoritmos del descriptor de orientación y rotación (ORB, por sus siglas en inglés: oriented fast and rotated brief) y DCT para crear una matriz de características y fusionarla con una marca de agua encriptada. Esta técnica identifica características locales y globales de la imagen.

La integración de modelos de aprendizaje profundo en los sistemas de marcado de agua mejora la robustez al identificar características únicas de la imagen, incluso cuando la imagen tenga distorsiones como transformaciones geométricas o procesamiento (Zhong y Shih, 2019; Jing, 2020; Solorzano y Tsai, 2023).

Las redes neuronales aprenden patrones complejos de las imágenes, lo que permite autenticarlas incluso después de haber sufrido diversas modificaciones. Han y col. (2021) utilizaron un modelo preentrenado de VGG19 para extraer los mapas de características, en el que, posteriormente, aplicaron la transformada discreta de Fourier (DFT, por sus siglas en inglés: discrete Fourier transform). El uso de DFT mejoró la robustez frente a manipulaciones geométricas. Darwish y col. (2023) desarrollaron un método usando las características extraídas de la imagen mediante la red neuronal VGG19. Huang y col. (2023) emplearon el modelo VGG para construir una matriz de características, utilizada para la protección de la imagen, resaltando las características detectadas. Gong y col. (2022) obtuvieron los mapas de características del modelo residual DenseNet, los cuales combinaron con los coeficientes de la DCT. El uso de un modelo DenseNet ayudó a identificar características de datos no vistos. Dong y col. (2023a) propusieron un sistema basado en NasNet Mobile, al que añadieron una capa de regresión en lugar de la capa de clasificación para

obtener 128 características, a las cuales se aplicó DCT. Xiang y col. (2023) emplearon un modelo neuronal ResNet como extractor de características. La red neuronal se entrena con características de diferentes filtros aplicados a la imagen. A pesar de la efectividad de los métodos de aprendizaje profundo para extraer características robustas, la mayoría de los métodos se enfocan en distorsiones geométricas o de procesamiento de señales.

El objetivo del presente trabajo fue desarrollar un sistema para la recuperación de imágenes en escala de grises, con el fin de determinar si la imagen ha sido distorsionada y autenticar al propietario, basado en un algoritmo de marcado de agua libre de distorsiones que utiliza una red neuronal siamesa como extractor de características.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó el conjunto de datos pertenecientes a MICC-F220 (Amerini y col., 2011) para entrenar y validar la autenticación de usuario; y se empleó el conjunto COCO 2017 por su diversidad de imágenes para evaluar la reconstrucción de la imagen (Lin y col., 2015). Se utilizó un código QR de 512×512 píxeles como marca de agua. El algoritmo se implementó en una computadora Alienware M16 R2 (marca registrada de Dell, Round Rock, Texas, Estados Unidos) con un sistema con GPU NVIDIA GTX 4050 y un procesador Intel Core Ultra 7 155H (1.4 GHz) con Windows 11, usando Pytorch versión 2.4.1. El equipo fue fabricado en China o México, dependiendo de la planta de producción.

El método propuesto se dividió en cinco etapas:

1. Preprocesamiento de la imagen. Se aplicó aumento de datos a la rama espacial y transformada discreta de wavelet (DWT, por sus siglas en inglés: discrete wavelet transform) para obtener los coeficientes de frecuencia baja (LL, por sus siglas en inglés: low-low). Se redimensionó la imagen a una dimensión de 128×128 píxeles para asegurar compatibilidad con la red neuronal siamesa de dos ra-

mas, que procesa características espaciales y frecuenciales.

2. Entrenamiento de la red neuronal. La red aprendió patrones invariantes en las características espaciales y frecuenciales. La combinación de ambas ramas creó una matriz de características.

3. Generación del código de usuario. Se creó la matriz de características y se vinculó lógicamente con la marca de agua, para verificar al usuario de manera eficaz.

4. Recuperación de la marca de agua. La red neuronal extrajo la matriz de características de la imagen distorsionada, y al combinarla con el código de usuario, se recuperó la marca de agua, incluso en imágenes manipuladas.

5. Reconstrucción de imagen sin distorsiones. Se utilizó una red neuronal artificial que aprendió a comprimir y reconstruir datos de entrada denominada autoencoder, para reconstruir la imagen distorsionada en escala de grises, verificando su autenticidad.

Preprocesamiento de las imágenes

En esta etapa, se aplicaron dos procesos de imágenes para generar las entradas para cada rama de la red neuronal. Primero, se realizó un proceso de aumento de datos para introducir distorsiones geométricas y de procesamiento de imágenes a las imágenes originales O_k del conjunto de datos, donde $k = 0, \dots, L$, generando versiones modificadas A_k , permitiendo detectar características invariantes, mejorando su capacidad para aprender representaciones robustas.

Las técnicas de aumento de datos empleadas incluyen: rotaciones de imágenes de 0° a 360° , con incrementos de 15° . Traslaciones de imágenes en el eje x, eje y, o ambos, con desplazamientos que van de 10 a 150 píxeles en pasos de 20 píxeles. Escalado de imágenes a dimensiones de 64×64 , 128×128 , 512×512 y 1024×1024 píxeles. Recorte de imágenes desde las esquinas y el centro,

con tamaños de 50 x 50, 100 x 100 y 150 x 150 píxeles. Aplicación de diferentes filtros, incluyendo filtros promedio, filtros gaussianos, filtros medianos y desenfoque, con tamaños de núcleo de 5 x 5, 7 x 7 y 11 x 11 píxeles. Introducción de ruido sal y pimienta con densidades del 5 %, 9 % y 15 %. Compresión JPEG con factores de calidad de imagen de 30, 50, 70 y 90 píxeles.

Posteriormente, se aplicó el primer nivel de DWT para extraer los coeficientes de frecuencia LL, denotados como F_k . Estos coeficientes se seleccionan porque contienen información de baja frecuencia, y permiten eliminar características redundantes, así como ruido que contenga la imagen, lo cual aumenta la robustez frente a distorsiones, como compresión, transformaciones geométricas y adición de ruido. Las imágenes F_k y A_k se redimensionaron a un tamaño estandarizado de 128 x 128 píxeles. Este redimensionamiento garantiza dimensiones de entrada consistentes, simplificando el entrenamiento de la red neuronal y la estructura de los datos.

La incorporación de los coeficientes LL de la DWT en el entrenamiento de la red neuronal garantizó una recuperación precisa de la marca de agua para la autenticación de propiedad, incluso cuando la imagen ha sido distorsionada. Al integrar estos coeficientes, se estableció una relación estable entre las características espaciales y frecuenciales de la imagen. Dicha relación permite a la red neuronal identificar patrones invariantes, para la creación de una matriz de características que se mantiene similar tanto cuando la imagen está intacta como cuando está distorsionada, lo que asegura la precisión en la recuperación de la marca de agua y la verificación de la propiedad. La siguiente fase consistió en entrenar la red neuronal utilizando tanto las imágenes A_k como los coeficientes F_k .

Entrenamiento de la red neuronal

En esta etapa, la red neuronal aprende patrones invariantes a partir de los datos. En el contexto del marcado de agua libre de distorsiones,

las redes neuronales siamesas son utilizadas como un extractor de características, que son cruciales para crear el código de usuario y autenticar la imagen (Arevalo-Ancona y col., 2024).

La red neuronal siamesa AlexNet consta de dos ramas idénticas con los mismos parámetros, y está diseñada para aprender la correlación de patrones entre la imagen original y la imagen distorsionada, lo que permite identificar patrones comunes entre las entradas (Vizváry y col., 2019; Wiggers y col., 2019; Aydemir y col., 2022; Li y col., 2023a).

El extractor de características basado en la red neuronal siamesa se entrena utilizando una función de pérdida contrastiva $CLoss$. Esta función de pérdida permite a la red neuronal aprender representaciones invariantes de las imágenes de entrada, que son esenciales para construir matrices de características similares tanto para las imágenes originales como para las distorsionadas. La pérdida contrastiva minimiza la distancia entre los vectores de salida, asegurando que sus representaciones permanezcan similares a pesar de las distorsiones. Al mismo tiempo, maximiza la distancia entre pares de imágenes disímiles, para distinguir entre características no relacionadas (Ye y col., 2025). Esta función de pérdida permite a la red neuronal aprender una representación semántica de las imágenes al capturar efectivamente patrones similares de los coeficientes derivados mediante la DWT y las características espaciales.

La $CLoss$ se define como (1):

$$CLoss = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [(1 - y_k)(d) + y_k(\max(0, m - d))] \quad (1)$$

Donde:

N = el lote de imágenes

y = valor de la característica analizada

$y_k = 0$ cuando A_k (imagen) está distorsionada

$y_k = 1$ cuando A_k (imagen) no ha sido modificada

El término m ($m = 2$) define la distancia mínima d (2) entre los vectores de salida: V_{out1} y V_{out2} .

$$d = \sqrt{V_{out1} - V_{out2}} \quad (2)$$

Donde:

V_{out1} y V_{out2} = vectores de salidas de la red neuronal siamesa

Para reforzar la autenticación de imágenes distorsionadas, se utilizó un autoencoder para reconstruir la imagen sin distorsiones en escala de grises. Su codificador comparte la arquitectura de la rama espacial de la red siamesa, proporcionando características invariantes y consistentes. El decodificador, mediante convoluciones transpuestas, reconstruyó una imagen similar a la original. Este diseño optimizó la eficiencia computacional mejorando la reconstrucción de las imágenes distorsionadas.

Las imágenes A_k se utilizaron como entrada para el autoencoder, donde el codificador comprimió estas imágenes en una representación latente y el decodificador generó la imagen reconstruida. Para lograr un aprendizaje robusto del espacio latente, se incorporó una reparametrización (3):

$$r_z = \mu + \epsilon(\sigma) \quad (3)$$

Donde:

r_z = espacio latente

ϵ = salida

μ = media

σ = desviación estándar

La reparametrización en el autoencoder permitió introducir variabilidad controlada en el espacio latente, facilitando un aprendizaje más robusto y estable. El codificador generó la salida ϵ y se obtuvo su media (μ) y desviación estándar (σ) generando un espacio latente (r_z), modelado como una distribución de probabilidad continua. Esto aseguró que el modelo pudiera capturar mejor las variaciones de las imágenes distorsionadas y mejorar la calidad de la reconstrucción, generando imágenes más fieles a las originales.

La función de pérdida V_{Loss} se obtiene mediante la siguiente fórmula (4):

$$V_{Loss} = L_{recon} + \beta L_{KL} \quad (4)$$

Donde:

L_{recon} = pérdida de reconstrucción

β = Parámetro equilibra la calidad en reconstrucción de la imagen y el espacio latente

L_{KL} = Pérdida por divergencia

La siguiente ecuación (5) permite calcular L_{recon} , al medir la diferencia entre la imagen original (O_k) y la reconstruida (R_k), utilizando el error cuadrático medio (MSE, por sus siglas en inglés: mean squared error):

$$MSE = L_{recon} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (R_k - O_k)^2 \quad (5)$$

MSE = error cuadrático medio

R_k = Imagen reconstruida

O_k = Imagen original

Por otro lado, L_{KL} minimiza la diferencia entre la distribución latente aprendida y la distribución previa, para regularizar el espacio latente y evitar que el modelo memorice los datos de entrenamiento generando imágenes reconstruidas más precisas.

$$L_{KL} = \sum_{k=1}^N (\sigma_{rz^2} + \mu_{rz^2} - 1 - \log(\sigma_{rz^2})) \quad (6)$$

Donde:

σ_{rz^2} = desviación estándar del espacio latente

μ_{rz^2} = media del espacio latente

El parámetro β equilibra la calidad en reconstrucción de la imagen y el espacio latente. Un valor bajo β minimiza la pérdida de reconstrucción, proporcionando mayor calidad de la imagen reconstruida, pero con representaciones latentes menos estructuradas. Por el contrario, un valor alto β genera representaciones de características más consistentes e invariantes, con una menor precisión en la reconstrucción. Finalmente, el autoencoder es

utilizado para reconstruir imágenes al aprender características de las imágenes distorsionadas durante el entrenamiento. La función de pérdida, basada en el MSE, fue usada para que la red neuronal aprendiera patrones de las imágenes para su reconstrucción.

Generación del código de usuario

Generación de la matriz de características

Una vez entrenada la red neuronal siamesa, se generó el código de usuario. La construcción de este código de usuario combina una matriz de características, obtenida a partir de las salidas de las ramas de la red neuronal siamesa con la marca de agua binaria.

La matriz de características (f_v) se obtuvo mediante la siguiente fórmula (7):

$$f_v = \begin{bmatrix} V_{out1} \\ V_{out2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Donde:

f_v = Matriz de características

V_{out1} = Vector de salida 1 generado por la red siamesa

V_{out2} = Vector de salida 2 generado por la red siamesa

Los vectores de salida V_{out1} y V_{out2} representan las características únicas de la imagen obtenidas por las ramas de la red neuronal B_1 y B_2 y se obtienen mediante las siguientes ecuaciones (8):

$$V_{out1} = B_1(O_k) \text{ y } V_{out2} = B_2(R_k) \quad (8)$$

Donde:

V_{out1} = Vector de salida 1 generado por la red siamesa

B_1 = Rama 1 de la red neuronal

O_k = Imagen original

V_{out2} = Vector de salida 2 generado por la red siamesa

B_2 = Rama 2 de la red neuronal

R_k = Imagen reconstruida

Posteriormente, f_v se redimensionó en una matriz f_{vr} al mismo tamaño que la marca de

agua (512 x 512 píxeles), mediante escalado por vecinos más cercanos para expandir el número de elementos (9):

$$f_{vr} = \begin{bmatrix} c_{1,1} & \cdots & c_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{m,1} & \cdots & c_{m,n} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Finalmente, f_{vr} se binariza (f_m) para crear el código de usuario (10):

$$f_m(i,j) = \begin{cases} 0 & \text{si } f_{vr}(i,j) \leq 0 \\ 1 & \text{si } f_{vr}(i,j) > 0 \end{cases} \quad (10)$$

La matriz de características incluye características espaciales como frecuenciales invariantes, lo que aumenta la robustez ante distorsiones o manipulaciones.

Código de usuario

El código de usuario es un elemento externo diseñado para autenticar la propiedad de la imagen de manera segura. Debe almacenarse en un dispositivo dedicado para preservar la integridad y autenticidad de la imagen original. En un dispositivo dedicado para preservar la integridad y autenticidad de la imagen original. Se obtiene utilizando la operación lógica XOR (por sus siglas en inglés: O exclusivo) y que se representa con el símbolo ($\oplus$), en la ecuación (11):

$$uc = f_m \oplus w \quad (11)$$

Donde:

uc = código de usuario uc combina lógicamente

$\oplus$ = operación lógica XOR

f_m = matriz de características binarizada extraída de la imagen distorsionada mediante la red neuronal previamente entrenada.

w = código QR

Este proceso genera una imagen binaria que parece ser ruido aleatorio. La operación XOR proporciona un elemento robusto para la autenticación de la imagen. Este método mejora la seguridad del código de usuario para evitar la autenticación no autorizada de la imagen.

Reconstrucción de imagen

Recuperación de la marca de agua para la autenticación de imágenes

El proceso de recuperación de la marca de agua permite autenticar al usuario de la imagen. Para recuperar la marca de agua, se aplicó la operación lógica XOR en la ecuación (12):

$$w' = f_m \oplus uc \quad (12)$$

Donde:

w' = marca de agua

$\oplus$ = operación lógica XOR

f_m = matriz de características binarizada extraída de la imagen distorsionada mediante la red neuronal previamente entrenada.

uc = código de usuario

La red neuronal entrenada está diseñada para generar una matriz de características similar para la misma imagen debido a la función de pérdida, incluso si ha sido distorsionada. Como resultado, la operación XOR permite recuperar una marca de agua w' que es similar a la original. La propiedad de la imagen se autenticó correctamente con la reconstrucción de la marca de agua. Una vez recuperada la marca de agua, se empleó el autoencoder entrenado para reconstruir una versión en escala de grises y a escala reducida (128×128 píxeles) de la imagen, con el propósito de verificar su autenticidad. Este proceso de reconstrucción se diseñó para restaurar imágenes que hayan sido sometidas a los tipos de distorsiones incluidas durante el entrenamiento, como traslaciones, recortes, empalmes o ataques de copia y pegado. Sin embargo, si la distorsión es severa, la imagen reconstruida puede presentar errores o, en algunos casos, resultar en una imagen completamente diferente. Además, el proceso de reconstrucción se limitó a imágenes pertenecientes al conjunto de datos utilizado durante el entrenamiento, lo que garantizó que solo reconstruyera imágenes que había aprendido a reconocer. Esta restricción disminuyó el riesgo de reconstrucciones erróneas provenientes de imágenes no relacionadas.

Evaluación de la eficacia del algoritmo

Los experimentos se realizaron utilizando las 110 imágenes sin manipular del conjunto de imágenes MICC-F220, considerando la totalidad de los resultados obtenidos, sin excluir ningún caso. Además, los experimentos se repitieron en tres ocasiones independientes, con el objetivo de validar la consistencia y reproducibilidad de los resultados. El algoritmo propuesto se evaluó mediante distintas métricas para identificar las diferencias entre las marcas de agua recuperadas y las originales: error promedio de bits (BER, por sus siglas en inglés: Bit Error Rate) recuperados, correlación cruzada normalizada (NC, por sus siglas en inglés: Normalized Cross-Correlation) y la proporción máxima de señal a ruido de la imagen (PSNR, por sus siglas en inglés: Peak Signal-to-Noise Ratio). Estas métricas ofrecen una evaluación cuantitativa de la calidad y fidelidad de la marca de agua recuperada, reflejando su precisión y resistencia ante distorsiones.

El BER mide el porcentaje de píxeles incorrectos en comparación con la marca de agua original, evaluando la precisión y los errores en el proceso de recuperación (13).

$$BER = \frac{\text{Píxeles incorrectos}}{\text{Píxeles totales}} \quad (13)$$

La NC analiza la similitud entre la marca de agua recuperada w' y la original w , mediante la correlación entre sus píxeles. Un valor alto indica gran similitud, mientras que uno bajo refleja diferencias significativas.

$$NC = \frac{\sum (w'(x, y) - \mu_{w'})(w(x, y) - \mu_w)}{\sum \sqrt{(w'(x, y) - \mu_{w'})^2 (w(x, y) - \mu_w)^2}} \quad (14)$$

Donde:

w' = marca de agua recuperada

w = marca de agua original

μ_w y $\mu_{w'}$ = los valores promedio de w y w'

El PSNR cuantifica la relación entre la imagen original en escala de grises y la imagen reconstruida, evaluando la calidad visual. Un

valor alto de indica menor distorsión y mejor calidad de recuperación (15).

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{\max^2}{MSE} \right) \quad (15)$$

Donde:

$\max$ = valor máximo de los píxeles

MSE = Error cuadrático medio

Las pruebas experimentales incluyeron diversas distorsiones geométricas y de procesamiento de señal para validar la robustez del algoritmo.

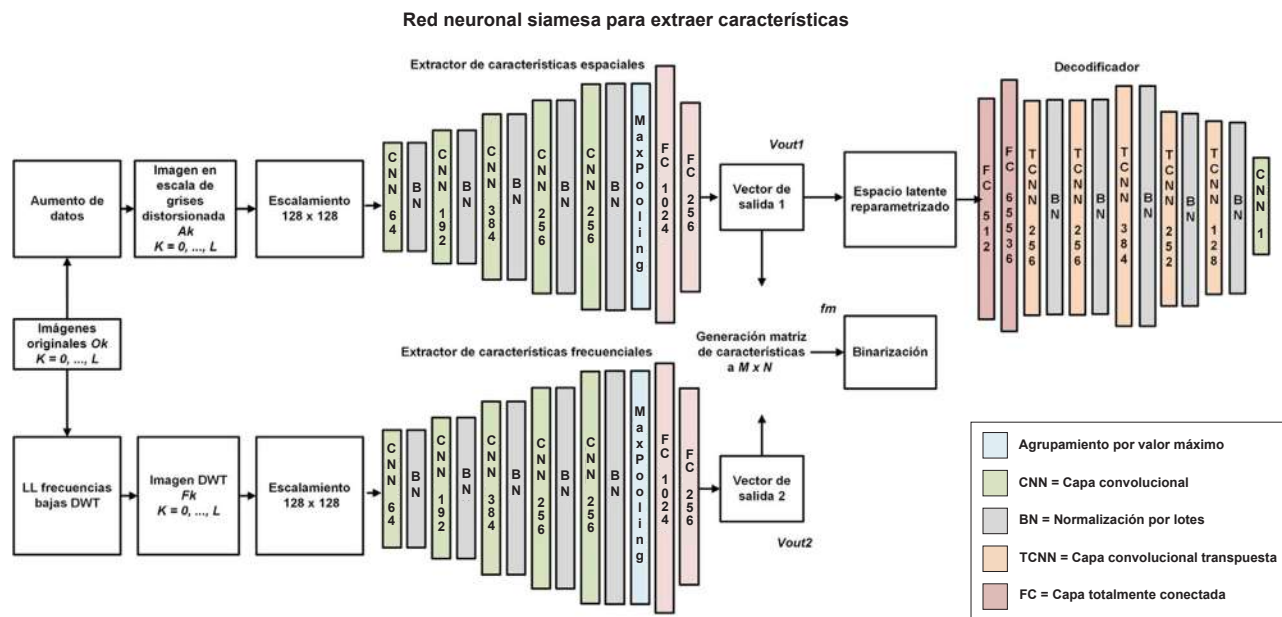
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Eficacia del proceso de recuperación de la marca de agua

El principal aporte del método propuesto, con una red neuronal siamesa basada en el modelo AlexNet (Figura 1), radica en su enfoque orientado a la identificación del propietario de una imagen, mediante la extracción y combinación de características robustas espaciales (ruta superior en la Figura 1) y frecuenciales (ruta inferior), obtenidas por la red neuronal. En el proceso se capturan simul-

táneamente patrones consistentes e invariantes presentes en la representación frecuencial, a través de la DWT, así como en la representación espacial en escala de grises. Mediante su posterior integración (parte central del esquema), es posible detectar alteraciones en la estructura de la imagen, lo que facilita su reconstrucción sin distorsiones significativas. Por otra parte, optimizar la eficiencia computacional permitió reducir los tiempos de entrenamiento, sin comprometer la precisión, asimismo, el desempeño del autoconder mostró ser eficiente para la reconstrucción de imágenes.

A diferencia de enfoques previos, como el de Arevalo-Ancona y col. (2024), que emplean redes siamesas centradas en características obtenidas de una red convolucional (FCN, por sus siglas en inglés: Fully Convolutional Networks) para autenticar al usuario, el método propuesto incorpora un Autoencoder Variacional (VAE, por sus siglas en inglés: Variational Autoencoders) en su arquitectura. En este diseño, la salida de la rama encargada para la extracción de características de la



■ Figura 1. Arquitectura de la red neuronal: combinación de red siamesa para la extracción de características y reconstrucción de la imagen manipulada mediante un decodificador.

Figure 1. Neural Network Architecture: Combining a Siamese Network for Characteristics Extraction and reconstruction of the manipulated image by means of a decoder.

imagen en escala de grises se utiliza como entrada del decodificador del VAE, lo que permite reconstruir la imagen original a partir de su representación latente. Esta capacidad de reconstrucción no solo mejora la verificación de la propiedad, sino que también proporciona una herramienta eficaz para la detección de manipulaciones y la restauración de imágenes alteradas.

Los parámetros de arquitectura de la red neuronal propuesta determinan su capacidad de aprendizaje y desempeño (Tabla 1). En la Figura 2a se muestra el diagrama operacional, mediante el cual, la red neuronal ex-

trae las características de la imagen original (compuestas por los patrones consistentes e invariantes identificados en las representaciones frecuenciales y espaciales de la misma) y se les integra la información del usuario para generar el código de usuario. En la Figura 2b se ilustra el proceso de recuperación de la marca de agua (cuando esta ha sido alterada de forma no autorizada), que consiste en reconocer los elementos de la imagen distorsionada e incorporarles el código de usuario original (del propietario de la imagen) para recuperar las características de la imagen y establecer en ella los datos de autenticidad original.

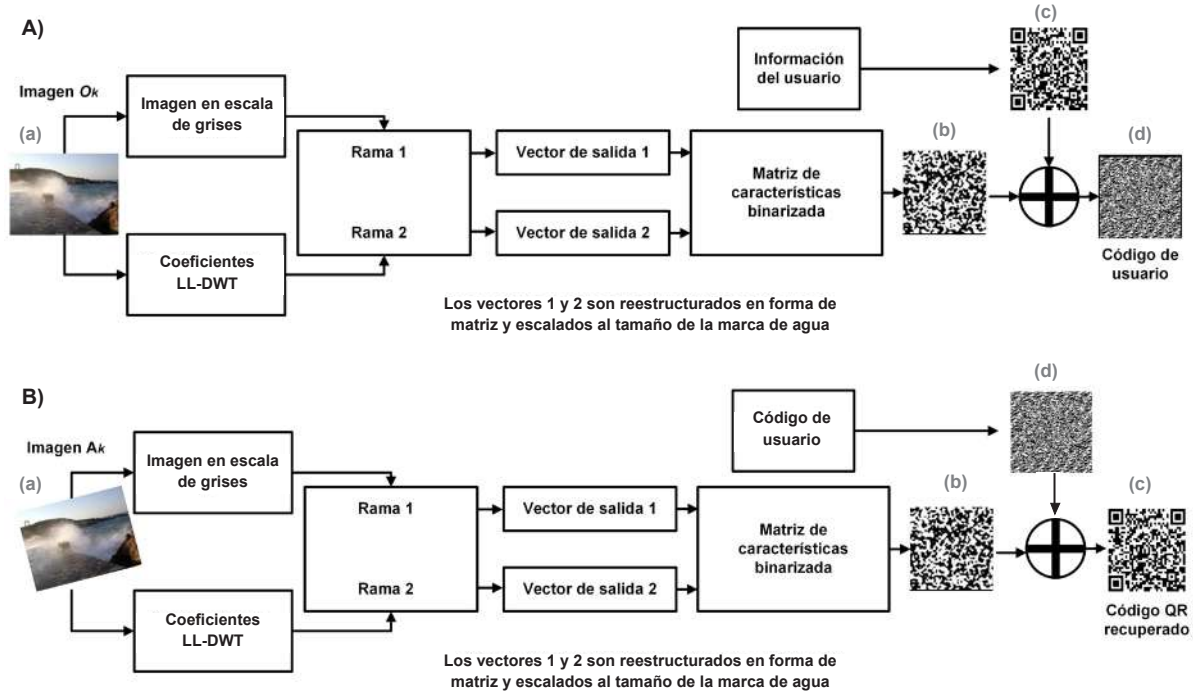
■ **Tabla 1. Configuración de las redes neuronales.**

Table 1. Neural networks configuration.

Capa	Neuronas	Tamaño del filtro	Paso	Relleno del mapa de características	Función de activación
Red neuronal siamesa para extraer características y el vector del espacio latente (entrada del decodificador)					
CNN 64	64	3 x 3	1	1	ReLu
CNN 192	192	3 x 3	2	1	ReLu
CNN 384	384	3 x 3	2	1	ReLu
CNN 256	256	3 x 3	2	1	ReLu
CNN 256	256	3 x 3	2	1	ReLu
FC 1024	1 024	---	---	---	ReLu
FC 256 (Vectores de salida)	256	---	---	---	ReLu
Decodificador del autoencoder para reconstruir imágenes					
FC 512	512	---	---	---	ReLu
FC 65536 (Redimensión [256, 16, 16])	65 536	---	---	---	ReLu
TCNN 256	256	3 x 3	1	1	ReLu
TCNN 256	256	3 x 3	2	1	ReLu
TCNN 384	384	3 x 3	2	1	ReLu
TCNN 252	252	3 x 3	2	1	ReLu
TCNN 128	128	3 x 3	2	1	ReLu
TCNN 1	1	3 x 3	2	1	Sigmoide
Hiperparámetros para la generación del código de usuario			Hiperparámetros para la reconstrucción de la imagen		
Hiperparámetros: Épocas = 20; Tamaño del lote de imágenes = 64; Tasa de aprendizaje = 0.001; Momento = 0.9; Optimizador = Adam			Hiperparámetros: Épocas = 15 000; Tamaño del lote de imágenes = 64; Tasa de aprendizaje = 0.000 05; Momento = 0.9; Optimizador = Adam		

El método propuesto mejoró la seguridad del código de usuario para evitar la autenticación no autorizada de la imagen (Figura 3). La Figura 4 presenta un ejemplo de la marca de agua recuperada de una imagen distorsionada. Las imágenes de los códigos QR contienen

información útil para evaluar visualmente la recuperación (Figura 5). La técnica obtenida en este estudio mejoró la extracción de características e identificó características robustas de la imagen, incluso en presencia de distorsiones (Chakraborty y col., 2024). Estas



■ Figura 2. Diagrama de generación del código de usuario; A) Generación del código de usuario (resultado de un proceso de encriptación, que combina el código QR original con las características de la imagen [extraídas por la red neuronal a partir de la imagen] a través de una operación lógica XOR: Ecuación 11); B) Recuperación de la marca de agua (Código QR recuperado, obtenido a partir de una imagen [posiblemente manipulada] y sus características extraídas, con el fin de verificar su autenticidad: Ecuación 12).

Figure 2. User code generation diagram; A) Generation of the user code (result of an encryption process, which combines the original QR code with the characteristics of the image [extracted by the neural network from the image] through an XOR logical operation: Equation 11); B) Recovery of the watermark (QR code recovered, obtained from an image [possibly manipulated] and its extracted characteristics, in order to verify its authenticity: Equation 12).



■ Figura 3. Proceso de generación de código de usuario; (2A) (a) Imagen original, (b) Matriz de características, (c) Código QR, (d) Código de usuario.

Figure 3. User code generation process; (2A) (a) Original image, (b) Features matrix, (c) QR code, (d) User code.



■ Figura 4. Proceso de recuperación de la marca de agua; (2B) a) Imagen distorsionada, b) Matriz de características, d) Código de usuario, c) Código QR recuperado.

Figure 4. Watermark process recovery; (2B) (a) Distorted image, (b) Features matrix, (d) User code, (c) Retrieved QR code.

	Rotación 110° sin recorte	Rotación 20° con recorte	Traslación en y = 150 píxeles	Traslación en x = 150, y = 150 píxeles	Transformada Afin	Recorte en el centro 100 x 100	Imagen escalada 64 x 64
Imagen distorsionada							
Código QR recuperado							
	BER = 0.009 NC = 0.996	BER = 0.007 NC = 0.994	BER = 0.009 NC = 0.995	BER = 0.009 NC = 0.992	BER = 0.009 NC = 0.997	BER = 0.001 NC = 0.999	BER = 0.001 NC = 0.999
	Compresión JPEG con QF = 30	Ruido sal y pimienta $\sigma = 9\%$	Ruido gaussiano $\mu = 0, \sigma = 0.015$	Filtro de mediana núcleo = 5 x 5	Filtro promedio núcleo = 5 x 5	Corrección gamma $\gamma = 1.1$	Ecuilización de histograma
Imagen distorsionada							
Código QR recuperado							
	BER = 0 NC = 0.999	BER = 0.001 NC = 0.999	BER = 0.001 NC = 0.999	BER = 0.001 NC = 0.999	BER = 0.005 NC = 0.998	BER = 0.002 NC = 0.998	BER = 0.005 NC = 0.989
	Ruido sal y pimienta $\sigma = 15\%$ y corrección gamma $\gamma = 1.1$	JPEG Q = 50 y filtro de mediana núcleo = 5 x 5	Corrección gamma $\gamma = 0.85$ y recorte en el centro	Ruido sal y pimienta $\sigma = 5\%$ y rotación 50°	Compresión JPEG con QF = 50 y filtro de mediana núcleo = 5 x 5	Ruido sal y pimienta $\sigma = 15\%$ y corrección gamma $\gamma = 0.85$	
Imagen distorsionada							
Código QR recuperado							
	BER = 0.007 NC = 0.995	BER = 0.007 NC = 0.994	BER = 0 NC = 1	BER = 0 NC = 1	BER = 0.007 NC = 0.994	BER = 0.007 NC = 0.995	

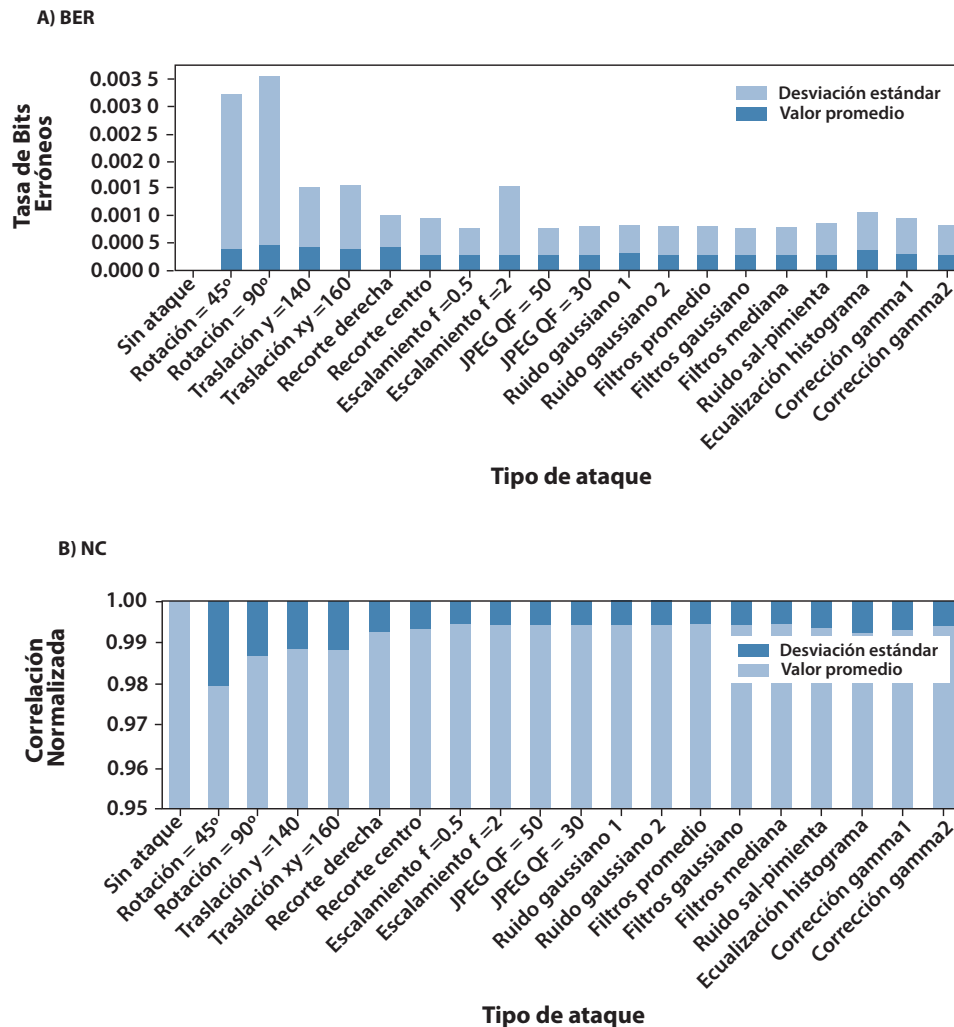
■ Figura 5. Recuperación de la marca de agua ante diferentes distorsiones. BER: Error promedio por bits; NC: Correlación cruzada normalizada.

Figure 5. Watermark recovery under different image processing distortions. BER: Bits Error Rate; NC = Normalized Cross-Correlation.

propiedades aumentaron el rendimiento y la verificación de propietario de las imágenes.

El proceso de recuperación de la marca de agua es eficiente contra la mayoría de distorsiones geométricas como rotación, traslación, transformación afín, recorte y escalado (Figura 5). Sin embargo, se obtiene un error máximo cuando una imagen específica tiene

rotación con recorte (BER = 0.007, NC = 0.994); y cuando la imagen es recortada, el valor promedio de los experimentos registró un BER de 0.002 y el NC arriba de 0.998 (Figura 6). Por otra parte, la Figura 6 muestra una desviación estándar baja, lo que indica que los datos están muy concentrados cerca de la media, es decir, que son muy similares entre sí.



■ Figura 6. Eficiencia en la recuperación de la marca de agua; A) BER (error promedio de bits), B) NC (correlación cruzada), ante distintas distorsiones (sin ataque, rotación, traslación horizontal/vertical, transformada afín, recorte central/derecho, escalamiento, JPEG QF = compresión JPEG, filtro gaussiano (núcleo 11 x 11) filtro mediana (núcleo 9 x 9), ruido sal y pimienta (densidad 0.05 %) ruido gaussiano ($\sigma = 0.09/0.2$), ecualización de histograma, corrección gamma ($y = 0.8/1.2$)).

Figure 6. Watermark Recovery Efficiency A) BER (average bit error), B) NC (cross-correlation), in the face of different distortions; (no attack, rotation, horizontal/vertical translation, affine transform, center/right cropping, scaling, JPEG QF = JPEG compression, gaussian filter (11 x 11 core) medium filter (9 x 9 core), salt and pepper noise (0.05 % density), gaussian noise ($\sigma = 0.09/0.2$), histogram equalization, gamma correction ($y = 0.8/1.2$)).

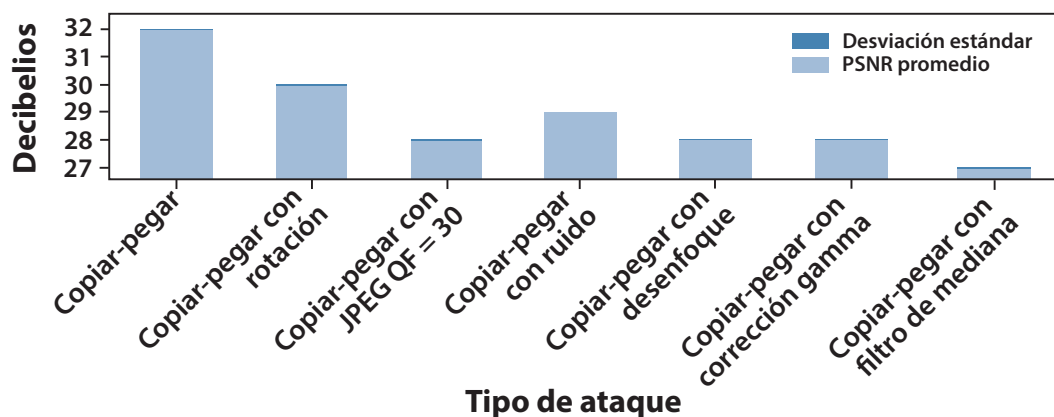
Los resultados indicaron una alta eficiencia en la recuperación de la marca de agua cuando la imagen tiene compresión JPEG (factor de calidad = 30), ruido sal y pimienta (densidad = 9 %), ruido gaussiano ($\mu = 0$, $\sigma = 0.015$) y operaciones de filtrado gaussiano y desenfoque (núcleo = 5×5). Cuando se aplica un filtro promedio, los resultados muestran un BER máximo en promedio de 0.007 y NC = 0.999.

Finalmente, también se mostró una alta robustez contra la combinación de distorsiones, logrando valores de NC superiores a 0.99 (Figura 5). La combinación de compresión JPEG y filtrado mediano o ruido sal y pimienta con corrección gamma incrementa el BER a 0.007, mientras que el NC se mantiene por encima de 0.994 (Figura 6).

El método propuesto demostró eficacia en su desempeño con técnicas existentes en términos de precisión de recuperación de la marca de agua y tiempos de procesamiento, destacando sus mejoras no solo de robustez y frente a distorsiones geométricas como rotación, traslación, transformación afín, recorte y escalado, sino también de la combinación de distintas distorsiones (Figura 7).

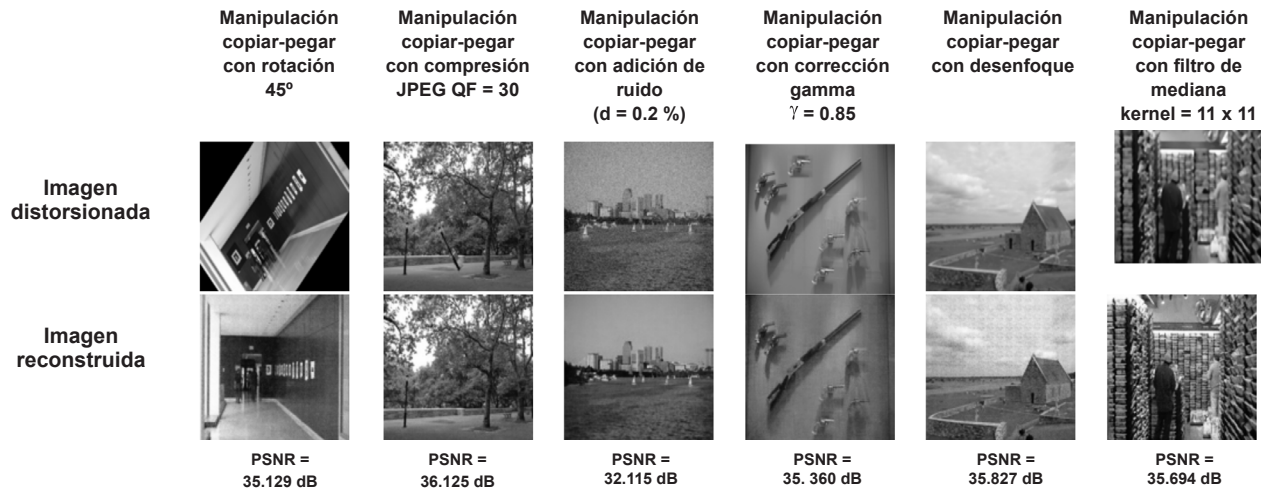
Efectividad en la reconstrucción de imágenes

La repetición experimental permitió verificar que el desempeño del método propuesto no se debe a condiciones particulares de una sola ejecución, sino que es reproducible. Aunque no se realizaron múltiples repeticiones para un análisis estadístico más amplio, estas dos ejecuciones permitieron confirmar que el comportamiento general del sistema es estable y coherente. La reconstrucción de imágenes desempeña un papel fundamental en el proceso de autenticación, ya que recupera una versión de la imagen original en escala de grises. Este procedimiento facilita la autenticación de la imagen al evidenciar posibles alteraciones o manipulaciones. La calidad en la reconstrucción de imágenes en escala de grises sometidas a diversas distorsiones y manipulaciones demostró que el método propuesto mantiene un alto PSNR, con valores promedio de los experimentos que oscilan entre 30.788 dB y 36.634 dB. La Figura 8 muestra un ejemplo particular, donde los valores oscilan entre 32.115 y 36.125. Además, el autoencoder reconstruye eficazmente imágenes alteradas por manipulaciones de tipo copia-pegar combinadas con otras distorsiones, conservando una alta fidelidad en la reconstrucción. Sin embargo, cuando las imá-



■ Figura 7. Eficiencia en la recuperación de la marca de agua evaluada mediante PSNR, que determina la relación entre la imagen original en escala de grises y la imagen reconstruida.

Figure 7. Efficiency in watermark recovery evaluated by PSNR, which determines the relationship between the original grayscale image and the reconstructed image.



■ Figura 8. Reconstrucción de la imagen en escala de grises ante diferentes distorsiones y manipulaciones.

Figure 8. Gray scale image reconstruction against distortions and manipulations.

genes son afectadas por ajustes de brillo o contraste, como la corrección gamma, la calidad de las imágenes reconstruidas disminuye, lo que evidencia una limitación del método propuesto frente a este tipo de distorsiones.

Comparación del método

El tiempo de recuperación de la marca de agua destacó la rapidez y precisión del método propuesto frente a modelos preentrenados. Tuvo una precisión mayor frente a enfoques existentes de marcado de agua libre de distorsiones, que las técnicas basadas en coeficientes de la DCT (Zhang, 2021), secuencias perceptuales (Li y col., 2023b) y modelos preentrenados como VGG o ResNet (Han y col., 2021; Darwish y col., 2023; Huang y col., 2023; Xiang y col., 2023) (Tabla 2). Asimismo, el esquema propuesto emplea una marca de agua de 512×512 píxeles, significativamente más grande que las utilizadas por métodos como Li y col. (2023b) (32×32), Darwish y col. (2023) y Hang y col. (2021; 2023) (64×64 píxeles).

Aunque modelos como VGG19, SqueezeNet y ResNet18 son eficientes en clasificación de imágenes, son menos efectivos al usarlos como extractores de características. Mientras que el método propuesto ofrece mayor precisión que otras arquitecturas neuronales preentre-

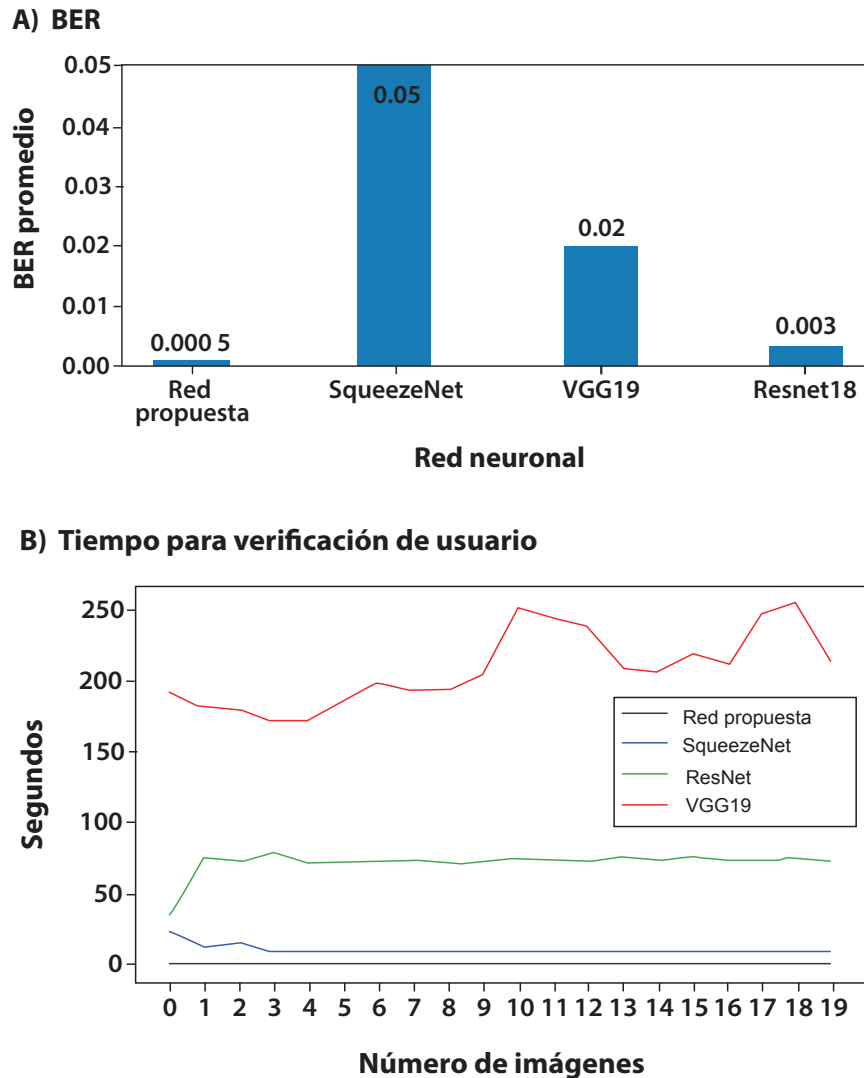
nadas, manteniendo un BER más bajo y mejor recuperación de la marca de agua (Figura 9), lo que se debe a la extracción de características mediante la red siamesa, que genera representaciones invariantes.

CONCLUSIONES

La eficacia obtenida para la autenticación de la propiedad de la imagen, por medio de la red neuronal propuesta, se debe a su diseño de doble rama. La primera rama extrae los detalles visuales en dominio espacial, y la segunda rama en el dominio DWT identifica las características generales más robustas. De esta forma, aprende al combinar la información de la imagen en su dominio espacial y de frecuencia extraídas mediante la DWT. La función de pérdida (al combinar estas características) hace que la red aprenda los detalles y las generalidades de la imagen que sean invariantes a distintos ataques. Utilizando estas características, se logró reconstruir la imagen que identifica al propietario con un valor BER menor a 0.002 6 y un NC superior a 0.998. Además de la recuperación del logotipo de propiedad, se logró autenticar el contenido de la imagen original reconstruyendo su contenido con una aproximación de PSNR entre 30.788 dB y 36.634 dB. Lo anterior se obtuvo utilizando la rama espacial como codifi-

■ **Tabla 2. Comparación del método propuesto.**
Table 2. Proposed comparison method.

Método	Imágenes naturales				
	Método propuesto		Zhang (2021)		Darwish y col. (2023)
	Características DWT con espaciales obtenidas con red siamesa		DC coeficientes de la DCT		Características VGG16
Tamaño de la marca de agua	512 x 512		288 x 288		64 x 64
Rotación	NC = 0.999 6		NC = 0.985 5		NC = 1
Traslación	NC = 0.999 7		---		---
Recorte	NC = 0.998 9		---		---
Escalado	NC = 0.998 9		NC= 0.986 8		NC = 0.992
Filtro de mediana	NC = 0.998 3		---		---
Filtro gaussiano	NC = 0.999 3		---		NC = 0.999 2
Filtro promedio	NC = 0.999 2		---		---
Compresión JPEG	NC = 0.999 0		---		NC = 0.999 6
Adición de ruido	NC = 0.999 1		NC = 0.999 5		---
Método	Imágenes médicas				
	Li y col. (2023b)	Han y col. (2021)	Dong y col. (2023a)	Huang y col. (2023)	Xiang y col. (2023)
	Características ORB y coeficientes DCT	Características VGG19 combinado con coeficientes DFT	Características NasNet con coeficientes de la DCT	VGG sobre parametrizada	Características estadísticas de la imagen obtenidas por ResNet
Tamaño de la marca de agua	32 x 32	64 x 64	32 x 32	64 x 64	256 x 256
Rotación	NC = 0.89	NC = 0.936 2	NC = 0.95	NC = 0.982 9	NC = 0.982 9
Traslación	NC = 0.89	---	NC = 0.93	NC = 0.975 1	---
Recorte	---	NC = 0.938 6	NC = 0.86	---	NC = 0.982 9
Escalado	NC = 0.80	---	NC = 0.88	NC = 0.982 9	NC = 0.983 3
Filtro de mediana	NC = 0.80	---	NC = 0.92	NC = 0.983 3	NC = 0.983 3
Filtro gaussiano	---	---	---	NC = 0.983 3	NC = 0.983 3
Filtro promedio	---	---	---	---	---
Compresión JPEG	NC = 0.78	---	NC = 0.94	NC = 0.983 4	NC = 0.983 4
Adición de ruido	NC = 0.78	---	NC = 0.86	NC = 0.987 5	NC = 0.983 0



■ **Figura 9.** Comparación entre la red neuronal propuesta con redes preentrenadas; A) BER, recuperación de la marca de agua usando diferentes redes neuronales como extractores de características; B) Tiempo de procesamiento para la recuperación de la marca de agua.

Figure 9. Comparison between the proposed neural network with pretrained networks; A) BER, watermark recovery with different neural networks as features extractors; B) Watermark recovery processing time.

cador, y su correspondiente decodificador. Finalmente, para la autenticación de la propiedad, la red neuronal propuesta presentó un menor costo computacional en comparación con métodos anteriores, y una mayor variedad de ataques a los que es resistente. Como trabajo a futuro se propone ampliar el alcance del algoritmo propuesto para la autenticación de videos, evaluando su efectividad en secuencias de imágenes, adaptar el método para la detección de áreas manipuladas en imágenes y mejorar la reconstrucción en-

focándose en generar imágenes a color (RGB) y de alta definición.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional (IPN) y Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo brindado en esta investigación.

DECLARACIÓN DE INTERESES

Los autores declararon no tener conflicto de interés alguno.

REFERENCIAS

- Amini, M., Sadreazami, H., Ahmad, M. O., & Swamy, M. N. S. (2018). A channel-dependent statistical watermark detector for color images. *IEEE Transactions on Multimedia*, 21(1), 65-73. <https://doi.org/10.1109/TMM.2018.2851447>.
- Amerini, I., Ballan, L., Caldelli, R., Del-Bimbo, A., & Serra, G. (2011). A SIFT-based forensic method for copy-move attack detection and transformation recovery. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 6(3), 1099-1110. <https://doi.org/10.1109/TIFS.2011.2129512>.
- Arevalo-Ancona, R. E., Cedillo-Hernandez, M., & Garcia-Ugalde, F. J. (2024). Robust image tampering detection and ownership authentication using zero-watermarking and Siamese neural networks. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 15(10). <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2024.0151046>
- Aydemir, G., Paynabar, K., & Acar, B. (2022). Robust feature learning for remaining useful life estimation using Siamese neural networks. In *2022 30th European signal processing conference (EUSIPCO)* (pp. 1432-1436). IEEE. <https://doi.org/10.23919/EUSIPCO55093.2022.9909630>.
- Chakraborty, U., Thilagavathy, D., Sharma, S. K., & Singh, A. K. (2024). Hybrid deep learning with AlexNet feature extraction and U-Net classification for early detection in leaf diseases. *ICTACT Journal on Soft Computing*, 14(3), 3255-3262. <https://doi.org/10.21917/ijsc.2024.0457>
- Darwish, M. M., Farhat, A. A., & El-Gindy, T. M. (2023). Convolutional neural network and 2D logistic-adjusted-Chebyshev based zero-watermarking of color images. *Multimedia Tools and Applications*, 83(10), 29969-29995. <https://doi.org/10.1007/s11042-023-16649-3>.
- Dong, F., Li, J., Bhatti, U. A., Liu, J., Chen, Y. W., & Li, D. (2023a). Robust zero-watermarking algorithm for medical images based on improved NasNet-Mobile and DCT. *Electronics*, 12(16), 3444. <https://doi.org/10.3390/electronics12163444>.
- Dong, S., Li, J., Bhatti, U. A., Ma, J., Dong, F., & Li, Y. (2023b). Robust zero-watermarking algorithm for medical images based on GFTT-KAZE and DCT. 26th ACIS International Winter Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Net-working and Parallel Distributed Computing (SNPD-Winter). <https://doi.org/10.1109/SNPD-Winter57765.2023.10223753>
- Gong, C., Liu, J., Gong, M., Li, J., Bhatti, U. A., & Ma, J. (2022). Robust medical zero-watermarking algorithm based on Residual DenseNet. *IET Biometrics*, 11(2), 135-146. <https://doi.org/10.1049/bme2.12100>.
- Han, B., Du, J., Jia, Y., & Zhu, H. (2021). Zero-watermarking algorithm for medical image based on VGG19 deep convolution neural network. *Journal of Healthcare Engineering*, (1), 5551520. <https://doi.org/10.1155/2021/5551520>.
- Huang, T., Xu, J., Tu, S., & Han, B. (2023). Robust zero-watermarking scheme based on a depth-wise overparameterized VGG network in healthcare information security. *Biomedical Signal Processing and Control*, 81, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2022.104478>.
- Ikbāl, F. & Gopikakamari, R. (2022). Performance analysis of SMRT-based color image watermarking in different color. *Information Security Journal*, 31(2), 157-167. <https://doi.org/10.1080/19393555.2021.1873465>.
- Jing, W. (2020). November). Research on Digital Image Copying Watermarking Algorithm Based on Deep Learning. In *2020 International Conference on Robots & Intelligent System (ICRIS)* (pp. 104-107). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICRIS52159.2020.00034>.
- Khafaga, D. S., Alhammad S. M., Magdi, A., Elkomy, O., Lashin, N. A., & Hosny, K. M. (2023). Securing transmitted color images using zero-watermarking and advanced encryption standard on Raspberry Pi. *Computer Systems Science and Engineering*, 4(2), 1967-1988. <https://doi.org/10.32604/csse.2023.040345>.
- Lee, Y. H., Seo, Y. H., & Kim, D. W. (2019). Digital hologram watermarking by embedding Fresnel-diffracted watermark data. *Optical Engineering*, 58(6), 035102. <https://doi.org/10.1117/1.OE.58.3.035102>.
- Li, M., Liu, X., Wang, X., & Xiao, P. (2023a). Detecting building changes using multimodal Siamese multitask networks from very-high-resolution satellite images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 61, 1-10. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2023.3290817>.
- Li, Y., Li, J., Bhatti, U. A., Ma, J., Li, D., & Dong, F. (2023b). Robust zero-watermarking algorithm for medical images based on ORB and DCT. 26th ACIS

International Winter Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing (SNPD-Winter). <https://doi.org/10.1109/SNPD-Winter57765.2023.10223992>.

Liu, Q. L., Yang, S. Q., Liu, J., Xiong, P. C., & Zhou, M. C. (2020). A discrete wavelet transform and singular value decomposition-based digital video watermark method. *Applied Mathematical Modelling*, 85, 273-293. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.04.015>.

Liu, Y. & Zhang, Z. (2021). Zero-watermarking algorithm based on DC component in DCT domain. 2021 International Conference on Electronic Information Engineering and Computer Science (EIECS). <https://doi.org/10.1109/EIECS53707.2021.9588068>.

Lin, T. Y., Maire, M., Belongie, S., Bourdev, L., Girshick, R., Hays, J., Perona, P., Ramanan, D., Zitnick, C. L., & Dollár, P. (2015). Microsoft COCO: Common objects in context. *ArXiv*. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1405.0312>. Fecha de consulta: 15 de enero de 2025.

Shamia, D., Balasamy, K., & Suganyadevi, S. (2023). A secure framework for medical image by integrating watermarking and encryption through fuzzy-based ROI selection. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 44, 7449-7457. <https://doi.org/10.3233/JIFS-222618>.

Shang, C., Xue, Y., Liu, W. X., & Liu, Y. (2023). Visual image digital watermarking embedding algorithm combining 3D Boolean CNN and Arnold technology. *IAENG International Journal of Computer Science*, 50(4), 1221-1231.

Solorzano, C. & Tsai, D. M. (2023). Watermark detection in CMOS image sensors using cosine-convolutional semantic networks. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 36(2), 279-290. <https://doi.org/10.1109/TSM.2023.3245606>.

Vizváry, L., Sopiak, D., Oravec, M., & Bukovčíková, Z. (2019). Image quality detection using the Siamese convolutional neural network. In *2019 International Symposium ELMAR* (pp. 109-112). <https://doi.org/10.1109/ELMAR.2019.8918678>. IEEE

Wiggers, K. L., Britto, A. S., Heutte, L., Koerich, A. L., & Oliveira, L. S. (2019). Image retrieval and pattern spotting using Siamese neural network. 2019 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2019.8852197>. Fecha de consulta:

10 de febrero de 2025.

Wu, J. Y., Huang, W. L., Zuo, M. J., & Gong, L. H. (2020). Optical watermark scheme based on singular value decomposition ghost imaging and particle swarm optimization algorithm. *Journal of Modern Optics*, 19(7), 1-13. <https://doi.org/10.1080/09500340.2020.1810346>.

Xiang, R., Liu, G., Li, K., Liu, J., Zhang, Z., & Dang, M. (2023). A zero-watermark scheme for medical image protection based on style feature and ResNet. *Elsevier*, 86(A), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2023.105127>.

Ye, H., Huang, X., Zhu, H., & Cao, F. (2025). An enhanced network with parallel graph node diffusion and node similarity contrastive loss for hyperspectral image classification. *Digital Signal Processing*, 158, 104965. <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2024.104965>.

Zhang, Z. (2021). Zero-watermarking algorithm based on DC component in DCT domain. 2021 International Conference on Electronic Information Engineering and Computer Science (EIECS). [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/EIECS53707.2021.9588068>. Fecha de consulta: 10 de enero de 2025.

Zhong, X. & Shih, F. Y. (2019). A robust image watermarking system based on deep neural networks. *ArXiv*. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1908.11331>. Fecha de consulta: 15 de enero de 2025.

Los autores deben solicitar al correo electrónico cienciauat@uat.edu.mx un usuario y contraseña para que sean registrados en la plataforma de la revista.

En su solicitud para postular un manuscrito deberán incluir título del mismo, su resumen y un correo oficial de una institución académica o centro de investigación (públicos o privados). No se recibirán manuscritos por otra vía, impresa o electrónica.

Es necesario revisar las políticas editoriales y las normas de publicación antes de enviar una contribución.

Directrices para autor/es/as

1.1. Contribuciones

Se reciben artículos y revisiones de literatura actualizadas en español, enfocados principalmente a temáticas de Iberoamérica, en las siguientes áreas del conocimiento:

- Física, matemáticas y ciencias de la tierra
- Biología y química
- Medicina y ciencias de la salud
- Humanidades y ciencias de la conducta
- Ciencias sociales
- Biotecnología y ciencias agropecuarias
- Ingenierías

1.2. Consideraciones generales

El material debe ser original e inédito y no estar considerado para publicarse simultáneamente en otras revistas u órganos editoriales. Los manuscritos deberán tener calidad científica y utilizar un lenguaje claro y preciso, definiendo los términos técnicos, para permitir su comprensión por lectores de otros campos y con diferentes niveles académicos. Es importante considerar que la revista es multidisciplinaria por lo que el perfil de los lectores es muy amplio.

Las siguientes secciones deben estar en español e inglés: título, resumen, palabras clave, títulos de tablas y figuras. Las figuras (imágenes, gráficos, mapas geográficos, mapas conceptuales, entre otros) además de su inserción al final del texto, deberán enviarse en archivos separados en formato jpg, a 300 dpi o superior (consultar especificaciones de figuras) y adjuntarse el archivo editable.

El texto deberá apegarse a la guía del sistema de unidades internacional.

El autor es responsable de la correcta redacción en cada sección del manuscrito.

1.3. Autores

El número de autores del manuscrito debe ser congruente con la calidad y cantidad de trabajo realizado y presentado. Un exceso de autores no justificable es causa de rechazo del mismo.

El manuscrito debe incluir la ficha autorial en una hoja por separado que indique: el nombre completo de los autores (evitando uso de iniciales; los apellidos paterno y materno serán enlazados con un guion corto).

La institución de adscripción del autor de correspondencia será en el siguiente orden: adscripción institucional (pública o privada), facultad, instituto o centro de investigación, área o departamento; dirección postal (incluir calle, número, colonia, ciudad, estado, país, código postal) y correo electrónico para correspondencia.

También deberá agregar adicionalmente un teléfono con lada (para comunicación editorial exclusivamente).

Los datos de los demás autores seguirán el siguiente orden: adscripción institucional (pública o privada); facultad, instituto o centro de investigación, ciudad, estado y país.

Para todos los autores se debe incluir número de CVU Conahcyt, ORCID iD y nivel SNII en caso de tener.

Proceso de evaluación y seguimiento

La clave de usuario y contraseña le permitirán al autor de correspondencia ingresar y subir a la plataforma su manuscrito, así como continuar el proceso editorial, revisando el estatus del mismo, una vez cumplidos los requisitos de formato y haberle asignado un editor.

El proceso editorial se desarrolla en cuatro etapas:

Revisión de formato.

Revisión por parte del editor de área.

Revisión por pares.

Diseño y adecuación editorial.

Los autores deberán atender todas las observaciones y sugerencias que se le indiquen durante las revisiones que reciba el manuscrito en cada una de las cuatro etapas, marcando en color rojo los cambios realizados al último manuscrito (es necesario que se trabaje en el mismo word que se le haga llegar en cada ocasión).

En la etapa de formato, los manuscritos se someten a una evaluación preliminar por parte del departamento editorial de la revista, para verificar que cumplan con los requisitos establecidos, y analizar el nivel de similitud con material previamente publicado (a través del software iThenticate). Una vez que se cumpla con las consideraciones generales de publicación, se asignará el trabajo al editor de área. Los trabajos que no concluyan esta etapa en un máximo de 30 días serán dados de baja.

En la segunda etapa, el editor de área revisará la pertinencia de los manuscritos para establecer si el trabajo se envía a evaluación o se da de baja. Es posible que el editor realice recomendaciones a los autores y sujete el manuscrito a una segunda revisión ante de emitir su decisión final. Los autores tienen 10 días para regresar su manuscrito con los cambios solicitados.

A partir de esta etapa, los autores además de dar respuesta a cada una de las observaciones, señalando en color rojo las modificaciones realizadas al último manuscrito, deberán anexar un listado con las respuestas a cada una de las observaciones y las modificaciones desarrolladas, indicando los números de línea donde se localizan.

Los manuscritos aprobados por editor de área serán enviados a evaluar por al menos dos pares académicos externos, expertos en el tema de interés, quienes determinarán la aceptación o rechazo del artículo, decisión basada en el análisis académico y científico del material. En caso de discrepancia en los resultados de los evaluadores, el escrito se enviará a un tercer árbitro, cuya decisión definirá la aceptación o rechazo.

Los autores recibirán el dictamen y comentarios emitidos por los evaluadores y deberán dar respuesta a cada una de las observaciones, señalando las modificaciones realizadas al último manuscrito. Se les establecerá un tiempo de respuesta que deberán respetar o el manuscrito será rechazado. En esta etapa, los autores tienen hasta 15 días para atender los cambios.

Los trabajos aceptados por evaluadores externos pasarán al proceso de corrección de estilo y revisión de formato, para adecuarlos al estilo editorial de la revista. Al terminar este proceso se emitirá la aceptación final del documento y se enviarán las pruebas de galera. Una vez enviadas las pruebas de galera el autor tendrá cuatro días naturales para su revisión; de no recibir respuesta en el tiempo indicado, el artículo se publicará con base en el criterio del editor de la revista.

En caso de que él o los autores requieran de un mayor tiempo para la respuesta, en las distintas etapas del proceso, deberán solicitarlo oportunamente al editor de la revista. En caso de que los interesados necesiten modificar al autor de correspondencia, este deberá ser parte de

los autores inicialmente propuestos. Es necesario que se justifique el cambio por escrito, donde se incluya la firma de ambos autores (actual y propuesto). El nuevo autor de correspondencia deberá firmar todos los documentos requeridos para publicar en CienciaUAT.

Preparación del manuscrito

3.1. Generalidades

El manuscrito estará escrito en procesador de texto Word, con letra Times New Roman a 12 puntos, a espacio y medio (1.5), en hoja tamaño carta, con margen en los cuatro costados de 2.54 centímetros. Las páginas estarán numeradas en forma continua. También los renglones deberán estar numerados en forma continua para facilitar el proceso de evaluación.

La redacción del manuscrito será en pasado y en forma impersonal.

Los agradecimientos se incluirán al final del texto solo para el caso de fuentes de financiamiento.

Las tablas y figuras (gráficos, imágenes, mapas conceptuales, mapas geográficos, fotografías, entre otros) deberán estar referenciadas en el texto y ubicarse al final del manuscrito, cada una en hoja separada. Llevarán títulos en español e inglés.

Las tablas se presentarán en formato Word y no como imágenes. Se debe evitar repetir innecesariamente en el texto la información incluida en las tablas, con excepción de aquella indispensable para la discusión de los resultados.

Las figuras (revisar formato de figuras) serán preferentemente a color, excepto las imágenes que de origen se generan en tonalidades de gris (micrografías, por ejemplo). Se deben enviar adicionalmente por separado en formato jpg a 300 dpi o superior, para asegurar la calidad de su impresión, así como el archivo editable en el que fueron generadas.

El texto que describe las figuras (nombre y descripción) estará redactado en forma independiente de las mismas y no deberá formar parte de la imagen.

En caso de utilizar mapas, estos deberán especificar coordenadas, indicando el área o lugar de estudio, atendiendo el siguiente formato: 98°12'15" W o 45°23'10" N. Cuando se trate de un polígono, es necesario indicar las coordenadas extrema superior izquierda y extrema inferior derecha. Las altitudes sobre el nivel del mar se citarán en metros. La rosa de los vientos deberá estar incluida en la parte superior izquierda, al interior de la figura para indicar la orientación.

En los manuscritos aceptados, el autor de correspondencia deberá proporcionar fotografía(s) para ilustrar la portada de su trabajo, en formato jpg a 300 dpi o superior. Además de enviar una imagen (tabla, gráfico, fotografía) para incluirla en la tabla de contenidos, acompañando al título de su contribución.

Estructura de los artículos científicos

Los manuscritos en formato de artículo científico tendrán una extensión máxima de 25 cuartillas (incluyendo tablas y figuras) y constará de las siguientes secciones:

Título

Deberá describir con claridad el contenido en un máximo de 150 caracteres en español (sin espacios).

Title

Es la traducción adecuada y fiel al inglés de lo que se expresa en español en el título.

Título corto (español) Es necesario sugerir un título corto para su contribución de máximo 6 palabras.

Resumen

El resumen en español no debe ser mayor a 300 palabras. Se debe incluir una breve introducción, el objetivo, metodología más importante, principales resultados y una conclusión.

Palabras clave

Se deben incluir de 3 a 5 palabras clave.

Abstract

Es la traducción adecuada y fiel al inglés de lo que se expresa en español en el resumen. No se establece un nú-

mero máximo de palabras, pero no debe ampliarse el contenido innecesariamente, excepto para expresar adecuadamente la idea original.

Key words

Es la traducción adecuada y fiel al inglés de las palabras clave.

Introducción

Su extensión máxima será de 3 cuartillas. Consistirá de una revisión actualizada de la literatura científica que destaque la importancia del estudio realizado. Los antecedentes, marco contextual, marco conceptual, marco metodológico y justificación, considerados necesarios para entender el alcance del conocimiento generado, pueden ir en esta sección de manera resumida y continua, sin subdividirla en secciones con encabezados. Debe concluir con el objetivo del trabajo.

Materiales y métodos

Se debe proporcionar la información técnica suficiente que permita replicar el trabajo o validar su credibilidad. Incluirá el diseño experimental (en su caso), método estadístico, principales métodos de análisis usados y las fuentes de dónde fueron obtenidos o modificados, así como la forma en que se obtuvieron los especímenes de estudio (en su caso).

Los equipos mencionados deben indicar marca, modelo y origen (ciudad y país). Se deben incluir todos los aspectos éticos considerados para trabajar con personas o animales.

Se debe proteger la identidad y los datos personales de los participantes en el estudio, asegurándose de obtener el consentimiento informado de las personas antes de divulgar cualquier información confidencial.

En los estudios del área de salud, se debe hacer mención expresa del comité de ética que aprobó el protocolo de investigación. En caso de que se haya trabajado con humanos, se manifestará de forma explícita el haber obtenido por escrito el consentimiento informado por parte de los mismos. Todos los procedimientos que se lleven a cabo en humanos deberán ajustarse a las normas éticas sobre experimentación humana de la Declaración de Helsinki de 1975.

En los estudios en que se utilicen animales de experimentación o que sean propiedad de particulares, se indicará claramente que se implementaron las medidas adecuadas para minimizar el dolor y la incomodidad, y se deberá contar con una declaración que identifique el comité de revisión de ética que garantizó y aprobó la metodología de trabajo. Si se trabajó con animales propiedad de particulares o clientes, en ensayos clínicos, se deberá haber obtenido el consentimiento informado del propietario y declararlo explícitamente en el documento.

Los experimentos y ensayos clínicos con personas o animales deben realizarse de acuerdo a las directivas establecidas por el Instituto Nacional de Salud (National Institutes of Health) en Estados Unidos de América, o con las Directivas del Consejo de la Comunidad Europea del 24 de noviembre de 1986 (86/609/EEC), y de acuerdo con las leyes y regulaciones nacionales y locales. Los editores se reservan el derecho a rechazar aquellos trabajos que ofrezcan dudas respecto a la obtención de un permiso adecuado o a la aplicación de procedimientos apropiados.

Resultados y discusión (pueden aparecer de manera independiente)

Adicional al ejercicio de señalar cuáles fueron los resultados encontrados, estos deberán ser contrastados con la literatura científica reciente, para establecer fehacientemente que el conocimiento generado es nuevo, novedoso o innovador.

Conclusiones

Se deben resaltar en forma breve el o los logros principales, de manera concreta y clara, evitando repetir las discusiones de resultados previos.

Conflictos de intereses

Indicar si se tiene o se considera tener conflicto(s) de in-

tereses, como el recibir o haber recibido en el pasado algún tipo de apoyo de alguna empresa o institución a quienes los resultados encontrados les favorezcan; o tener animadversión manifiesta o expresada de alguna forma contra alguna instancia o empresa a la que los resultados les afecte. Se recomienda revisar la política de conflictos de intereses.

Agradecimientos

En caso de haber recibido apoyo de alguna institución deberá ser señalado indicando el tipo de apoyo y en su caso el número de referencia del mismo.

Referencias

Al menos el 40 % de las referencias usadas para sostener los resultados y su aportación a la ciencia serán de los últimos 5 años. Ver las instrucciones para referencias (sección posterior en este documento).

Estructura de las revisiones actualizadas

Los manuscritos en formato de revisión actualizada tendrán una extensión máxima de 20 cuartillas (incluyendo tablas y figuras) y constará de las siguientes secciones:

Título

Describirá claramente el contenido del trabajo, en un máximo de 150 caracteres (sin espacios).

Title

Es la traducción adecuada y fiel al inglés de lo que se expresa en español en el título.

Título corto (español)

Es necesario sugerir un título corto para su contribución de máximo 6 palabras.

Resumen

Tendrá una extensión máxima de 250 palabras y deberá describir con claridad la temática que se revisa, su importancia y alcance. Se integrará por tres elementos: una breve introducción, el objetivo del trabajo y una conclusión que incluya la aportación del mismo.

Palabras clave

Se deben incluir de 3 a 5 palabras clave.

Abstract

Es la traducción adecuada y fiel al inglés de lo que se expresa en español en el resumen. No se establece un número máximo de palabras, pero no debe ampliarse el contenido innecesariamente, excepto para expresar adecuadamente la idea original.

Key words

Es la traducción adecuada y fiel al inglés de las palabras clave.

Introducción

Es la primera parte del manuscrito y en ella se debe introducir al lector en la temática que se abordará, su importancia, justificación, y en su caso, marco contextual, marco conceptual y marco metodológico, considerados necesarios para entender el alcance del conocimiento generado, pueden ir en esta sección de manera resumida y continua sin subdividirla en secciones con encabezados. Debe concluir con el objetivo del trabajo.

Esta sección irá seguida por el cuerpo del documento, que deberá estar dividido en secciones de acuerdo a las temáticas a considerar en el mismo.

Secciones

Se espera una amplia revisión bibliográfica que permita al lector profundizar en los avances recientes del tema que se describe, por lo que más del 50 % de las referencias mencionadas en cada sección (incluyendo introducción) deberán haber sido publicadas en los últimos 5 años, indicando particularmente lo más recientemente descubierto (año actual o anterior).

Conclusiones

Se debe resaltar el o los avances principales en el campo, de manera concreta y clara, evitando repetir el análisis de las secciones descritas en el cuerpo del documento.

Referencias

Al menos el 50 % de las referencias serán de los últimos 5 años. Ver las instrucciones para referencias (sección posterior en este documento).

Conflictos de intereses

Indicar si se tiene o se considera tener conflicto(s) de intereses, como el recibir o haber recibido en el pasado algún

tipo de apoyo de alguna empresa o institución a quienes los resultados encontrados les favorezcan; o tener animadversión manifiesta o expresada de alguna forma contra alguna instancia o empresa a la que los resultados les afecte. Se recomienda revisar la política de conflictos de intereses.

Agradecimientos

En caso de haber recibido apoyo de alguna institución deberá ser señalado indicando el tipo de apoyo y en su caso el número de referencia del mismo.

Aspectos adicionales

Abreviaciones y siglas

Las palabras o frases que deberán usarse frecuentemente en el manuscrito pueden ser sustituidas por sus abreviaciones, preferentemente por aquellas que sean de uso común en el campo, por ejemplo capacidad de retención de agua (CRA), índice de masa corporal (IMC). También es posible usar abreviaciones concebidas especialmente para el manuscrito, si son descritas previamente, como: Cuestionario médico de estrés laboral (CMEL).

En el caso de utilizar siglas en inglés en los nombres de los cuestionarios, de algún método o instrumento de medición, deberá definir el significado de los mismos. Por ejemplo: cuestionario de control de la imagen corporal en fotografías (BICP, por sus siglas en inglés: body image control in photos questionnaire); secuenciación de siguiente generación (NGS, por sus siglas en inglés: next generation sequencing). También deberán describirse los nombres de organizaciones como la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA, por sus siglas en inglés: Food and Drug Administration).

Unidades de medición

Las unidades de cualquier dato científico o de laboratorio y su abreviación deberán seguir el sistema internacional de unidades (SI) descrito por el Centro Español de Metrología (Novena edición). No deberá usarse punto en las abreviaciones (ejemplo kg, cm, °C, ó m). Las unidades en grados y el símbolo de % deben ir separados de los números: 27 °C, 83 %.

Se deben utilizar unidades en el siguiente formato: rad/s, y no en $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$. Otro ejemplo: se debe usar kg/m^3 en lugar de $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ($\text{kg} \times \text{m}^{-3}$ o $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

Referencias en el texto

Todas las publicaciones citadas en el texto del manuscrito aparecerán en la sección de referencias y viceversa. Se deben seguir las recomendaciones de la Guía de Normas APA 7ª edición español, excepto para el uso del et al., que es una locución en latín para abreviar la frase “y colaboradores”, lo cual se hará en el formato “y col.”. Los nombres de los autores y las fechas de las citas señaladas en el manuscrito deberán coincidir con el listado de la sección de referencias. Asimismo, revisar que todos los elementos de una referencia bibliográfica estén incluidos. Es responsabilidad del autor de correspondencia la correcta redacción de los nombres de los autores de los trabajos citados en su artículo o revisión.

Las citas o referencias insertadas en los lugares correspondientes del texto deberán ir entre paréntesis y contener el apellido paterno del autor y el año de publicación, ejemplo: (Martínez, 2015). También es posible que el autor utilice dos apellidos unidos con un guión (Martínez-González, 2019).

En el caso de dos autores se usará (Martínez y Gómez, 2014).

Para señalar más de dos autores se usará (Martínez y col., 2014).

En caso de más de una referencia, deberán separarse con punto y coma, y estarán ordenadas de acuerdo a la antigüedad (Martínez y Gómez, 2012; Martínez y col., 2014). Si dos o más referencias fueran del mismo año, se ordenarán de acuerdo al abecedario (Martínez y Gómez 2012; Martínez y Hernández, 2012; Miranda 2012).

Cuando las referencias van fuera del paréntesis, se deberán separar con coma o con el conjuntivo “y”, según corresponda, ejemplo: Gallegos y Elgier (2020), Torralbas (2020) y Rodríguez y col. (2021), quienes señalaron que...

Si existen dos referencias de los mismos autores en el mismo año, que pudieran confundirse, se usarán letras minúsculas, de acuerdo al abecedario (Martínez y Gómez, 2014a; 2014b).

Las citas textuales (texto copiado íntegramente, usadas excepcionalmente en el manuscrito, con extensión menor de 40 palabras), deberán ir entre comillas dobles, anotando entre paréntesis además del autor y el año, la(s) página(s) correspondiente(s), ejemplo: “El efecto placebo desapareció cuando...” (Martínez, 2015: 126); Martínez (2015), encontró que: “El efecto placebo desapareció cuando...” (p. 126).

En caso de utilizar una fuente secundaria (lo cual debe hacerse con moderación, cuando la obra original ya está agotada o solo disponible en otro idioma), debe mencionarse de la siguiente manera: tomada del informe bienio (2008-2009), Observatorio Iberoamericano de Economía Social y Cooperativa (oibes-coop) citado en Chaves-Avila y Pérez-de-Uralde (2012) y Chaves-Avila y col. (2013) (Tabla 3). En la lista de referencia se ubicará la fuente secundaria.

En caso de usar autor corporativo, como institutos, ministerios, organizaciones, entre otros, definirá el significado de las siglas la primera vez que aparezca la cita. Ejemplo: según datos del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS, 2015)...., y en lo subsecuente solo incluirá las siglas (IMSS, 2015).

También, en el caso de utilizar siglas en inglés, definirá el significado de las mismas. Por ejemplo, de acuerdo a la Asociación Americana de Antropología (AAA, por sus siglas en inglés: The American Anthropological Association) (AAA, 2008).

Los textos de materiales legales se citan de la siguiente forma: La Constitución Mexicana de los Estados Unidos Mexicanos (2013), en su artículo 27, establece que:

“La propiedad de las tierras y aguas comprendidas dentro de los límites del territorio nacional, corresponde originariamente a la Nación”...

En las comunicaciones personales, cartas y correos electrónicos se incorporará información adicional a la sugerida por el APA para poder identificar el origen de la misma: (Luis Fuentes-García, procesador de jaiba en Tampico, Tamaulipas, comunicación personal, 12 de junio, 2015).

Si la información proporcionada a través de una comunicación personal se encuentra disponible en un documento recuperable deberá ser citada dicha fuente en el texto (Fuentes, 2015) y en la sección de referencias en el formato de documento de archivo.

No se incluirán referencias o notas al pie de página.

Se deben evitar citas a tesis, manuales, apuntes y cualquier otro material que sea difícil de consultar.

Referencias

Las referencias bibliográficas deberán aparecer al final del manuscrito en orden alfabético y cronológico usando la técnica de sangría primera línea (1.25 cm) como se observa en los ejemplos de esta sección.

Artículos científicos

Aburto, J. M., Schöley, J., Kashnitsky, I., Zhang, L., Rahal, C., Missov, T. I., Mills, M. C., Dowd, J. B., & Kashyap, R. (2022). Quantifying impacts of the COVID-19 pandemic through life-expectancy losses: a population-level study of 29 countries. *International Journal of Epidemiology*, 51(1), 63-74. Agregar el identificador de objeto digital (Digital Object Identifier: DOI)*

Bustos, G. y Pérez, R. (2018). Relación entre factores psicosociales y el Índice de Función Sexual Femenina en población rural de la comuna de Teno, región de Maule. *Perinatología y Reproducción Humana*, 32(1), 9-18. DOI

Chao, A. & Jost, L. (2012). Coverage based rarefaction and extrapolation: standardizing samples by completeness rather than size. *Ecology*, 93(12), 2533-2547. DOI

Figueroa, K. M. (2020). Tratamientos psicológicos para mejorar la vida sexual en mujeres supervivientes de cáncer ginecológico: revisión sistemática. *Psicooncología*, 17(2), 293-309. DOI

González, R. (2016). Presentación: la perspectiva y el debate acerca de una economía cooperativa, solidaria y autogestionaria como centro de una economía social. *Revista de la Academia*, (21), 5-29. DOI

Tejada, K., González, A., Carty, E. y Camarena, F. (2023). Abundancia y diversidad de aves playeras en la playa El Agallito, distrito de Chitré, provincia de Herrera. *Tecnociencia*, 25(1), 41-62. DOI

En general, se citarán de acuerdo con la Guía de Normas APA 7a edición español, con las siguientes especificaciones:

En las referencias se incluirán hasta un máximo de 20 autores. En referencias con 2 a 20 autores se usará el vocablo “y” para señalar al último autor en citas de material publicado en español y el símbolo “&”, precedido por una coma (, &) para indicar el último autor en citas publicadas en inglés.

En las referencias de 21 o más autores se nombrarán los primeros 19 autores en el orden en que aparecen, seguidos de tres puntos...y el último autor, sin el uso del vocablo “y” o el símbolo “&”.

Nota 1: en revistas de publicación continua, que asignan número de páginas se usará el siguiente formato: *PLoS ONE*, 14(9), Article e0222224. DOI

*Nota 2: en caso de que la referencia contengan el DOI, se recomienda colocarlo según sea el caso.

Libros

Libro impreso

Ruiz, C. P. (2021). La culpa en la mujer. Una emancipación pendiente. Síntesis.

Libro en línea

Arias, S. y D. Aquino. (2019). Familia Cactaceae I. Flora del Bajío y de regiones adyacentes. Fascículo 209. Instituto de Ecología, A.C. DOI o Agregar el localizador de recursos uniforme (Uniform Resource Locator: URL).

Libro con editor

Alanís-Rodríguez, E., Mora-Olivo, A. y Marroquín-de-la-Fuente, J. S. (Eds.) (2020). *Muestreo ecológico de la vegetación*. Editorial Universitaria de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Capítulos de libros

Quintero, Y. y Del-Carpio, P. (2020). Encuentros y desencuentros en la familia tras el COVID-19. En Y. del-Valle, D. Alvarez, J. Batista y D. Rojas (Eds.), *Impacto del COVID-19 desde la perspectiva socio-económica en el contexto global* (pp. 31-34). Fondo Editorial Universitario Servando Garcés de la Universidad Politécnica Territorial de Falcón Alonso Gamero y ALININ. URL o DOI

Viter, R. & Latsunskyi, I. (2019). Metal oxide nanostructures in sensing. In O. V. Zenkina (Ed.), *Nanomaterials design for sensing applications* (pp. 41-91). Elsevier.

Bird, M. (2016). Economic aspects of entrepreneurship: The case of Peru. En C. C. Williams & A. Gurtoo (Eds.), *Handbook of entrepreneurship in developing economies* (pp. 113-130). Routledge.

Artículos de periódico

Carreño, L. (9 de febrero de 2020). La disputa gremial por los aranceles a las prendas de vestir. *El Espectador*. <https://www.elespectador.com/economia/la-disputa-gremial-por-los-aranceles-las-prendas-de-vestir-articulo-903768>

Entrevistas

Nacif, B. (2018). Presidente de la Comisión de Prerrogativas del Instituto Nacional Electoral (INE), Ciudad de México, México.

Sitios, páginas y libros electrónicos

National Cancer Institute (2019). SEER Cancer Stat Facts. [En línea]. Disponible en: <https://seer.cancer.gov/statfacts/html/mulmy.html>. Fecha de consulta: 10 de agosto de 2022.

Cuando la referencia es de un documento de archivo PDF

Rodríguez, R. (2019). Una guía para combatir el Bullying [Archivo PDF]. [En línea]. Disponible en: <https://www.url.com>. Fecha de consulta: 3 de febrero de 2023.

Authors are required to send an email to cienciauat@uat.edu.mx to formally request a username and a password so they can register at the journal's portal.

As part of their submission, authors must include the title of their manuscript, an abstract and an official email address from their educational institution or research center (public or private). Manuscripts will not be received by any other print or electronic means.

It is necessary to review the editorial guidelines and the editorial policies before the submission of a manuscript.

Instructions for authors

1.1. Submissions

The journal welcomes articles and critical literature reviews in Spanish, which are mainly focused on Latin American issues, and within the following fields of knowledge:

- Physics, Mathematics and Earth Sciences
- Biology and Chemistry
- Medicine and Health Sciences
- Humanities and Behavioral Sciences
- Social Sciences
- Biotechnology and Agricultural Sciences
- Engineering

1.2. General considerations

Manuscripts submitted to the journal should be original, unpublished and not being under consideration for publication simultaneously in another journal or editorial agency. Manuscripts should have scientific quality and use clear and accurate language, defining technical terms as necessary to make it accessible to readers from other academic fields and levels. It is important to consider that the journal is multidisciplinary, and therefore, its readers come from widely diverse backgrounds.

The following sections should be written in Spanish and English: title, abstract, key words, tables and figures captions. Figures (images, graphs, geographic maps, conceptual maps, among others) should be additionally sent in a separate file in jpg format 300 dpi or higher to ensure printing quality (Please review the figures' specifications). The editable file of the figures should also be attached.

The text should be adhered to the guide for the use of International System of Units.

The author is responsible for the appropriate use of academic writing in each of the sections of the manuscript.

1.3. Authors

The number of authors of the manuscript should be in accordance with the quality and the quantity of the work carried out and presented. An unjustified number of authors may cause the rejection of the manuscript.

The manuscript must include a cover page, which should include the full name(s) of the author(s), (no initials should be used; both last names should be hyphenated).

The affiliation of the corresponding author should be provided in the following order: institutional affiliation (public or private) name of school or faculty, institute or research center, unit or department; address (including street, number, neighborhood, city, state, country, zip code) and email address for correspondence.

A telephone number with the international code should also be provided (for editorial communication only).

The contact information of the rest of the authors should be provided in the following order: institutional affiliation (public or private) name of school or faculty, institute or research center, unit or department, city, state and country.

For all the authors, information related to the Conahcyt CVU number, ORCID iD, and level of SNII, in case they are members of it, should be provided.

Peer review and follow-up

The username and password allow the corresponding author to log in and upload their manuscript to the platform. They will also be used to continue the editorial process, review the status of their manuscripts, once the manuscript has met the formatting requirements and been assigned to a field editor.

The editorial process is developed into four stages:

Formatting assessment.

Field editor screening.

Anonymous peer review.

Editorial design and adjustment.

Authors are expected to fully comply with the revisions required in each of the four stages of the review process, highlighting in red color the changes made to the most updated version of the manuscript (authors are expected to use the same Word document received in each of the stages).

In the formatting assessment stage, manuscripts will be subject to a preliminary review by members of the Editorial Department of the journal, to ensure that they meet the thematic and format requirements, and to analyze the levels of similarity with previously published material (through the iThenticate software). Once all the general considerations for publication are fulfilled, the manuscript will be assigned to the area editor. Those manuscripts that fail to complete this stage within a 30 day period will be cancelled.

In the second stage, the area editor will assess the relevance of manuscripts to determine whether they are sent out for peer review or not. It is possible for the area editor to provide the authors with feedback and may even require a second round of review prior to making a final decision. As such, authors will have 10 days to submit their manuscript with the required changes.

From this stage, in addition to making each of the required corrections, which will need to be highlighted in red color on the most recent version of the manuscript, authors will need to submit a separate form in which they provide a detailed response to each of the comments or suggestions, indicating the line numbers on which they are located.

Those manuscripts approved by the area editor will then be assigned to at least two expert and external peer reviewers, who will determine whether they are accepted or rejected based on an academic and scientific analysis. In the event of disagreement between the reviewers' decisions, the manuscript will be sent out to a third reviewer, whose decision will define its acceptance or rejection.

Authors will receive the decision and comments made by the reviewers and will be required to provide a response to each of the comments, indicating the changes made on the last version of the manuscript. They will have a 15-day period to revise the manuscript as required by the reviewers. Failure to make the required corrections within the specified time frame will result in manuscript rejection.

All manuscripts accepted by the peer reviewers will undergo a process of editorial and format revision to adjust them to the required publication format of the journal. Once this stage is completed, the acceptance letter of the manuscript will be issued and the proofs will be sent to the authors, who will have four calendar days to check and correct them. If the authors do not respond within the time frame, the article will be published following the Editor's judgment.

In the case the authors need an extension to respond to the requirements in any of the different stages of the process, they will have to make a formal request to the journal's Editor. In case the authors need to replace the corresponding author, the new one will have to be one of the initially listed authors. It is necessary to submit a form, on which the authors provide a written justification of the replacement request. The form will also have to include the signatures of both, the current and the proposed corresponding authors. The new corresponding author will be expected to sign all the required documents to publish in the CienciaUAT journal.

Manuscript preparation

3.1. General considerations

The manuscript should be written in Microsoft Word, with a 12-point Times New Roman font, spaced at 1.5, formatted into Letter page size, with 2.54 cm margins on every side. Pages should be numbered sequentially. Lines should also be numbered sequentially to facilitate the evaluation process.

The manuscript must be written in past tense and in an impersonal form. Acknowledgments must be included in the final part of the text and only for cases of sources of financial support.

Tables and figures (graphs, images, conceptual maps, geographic maps, photographs, among others) must be referenced in the text and placed towards the end of the manuscript, each in a separate sheet. They will include captions in both Spanish and English.

Tables need to be presented in MS Word format and should not be included as images. Information included as part of tables and figures should not be repeated in the text, except when it is necessary for the discussion of results.

Figures (review figures format) should be preferably provided in color, except those images that are originally generated in grayscale shades (micrographs, for example). Figures should be additionally submitted in a separate file in jpg format at 300 dpi or higher to ensure printing quality. The editable file in which they were generated should also be submitted.

The text describing the figures (title and description) must be drafted independently and not as part of the image.

In case maps are used, these should specify geographical coordinates indicating the area or place of study, adhering to the following format: 98°12'15" W o 45°23'10" N. When it comes to a polygon, the upper left and lower right coordinates should be indicated. The altitude above the sea level should be cited in meters. The wind rose should be included in the upper left corner, within the figure to indicate its orientation.

In the case of those accepted manuscripts, the corresponding author should provide photograph(s) to illustrate the cover page of their work in a jpg format at 300 dpi or higher. Additionally, an image (table, graph or photograph) should be submitted to be included in the Table of Contents, alongside the title of their contribution.

Structure of the articles

Manuscripts in the form of scientific articles must have a maximum of 25 pages (including figures and tables) and will include the following sections:

Title

The title should clearly describe the contents of the article within a length of 150 characters in Spanish (without spaces).

Title

It is the appropriate and accurate translation of the Spanish title into the English language.

Short title (Spanish). Authors should also provide a shorter version (maximum 6 words) of the manuscript title.

Abstract

The abstract in Spanish must not exceed 300 words, including a brief introduction, the objective or purpose, the methods used, main findings and a conclusion.

Keywords

A list of three to five keywords should be included.

Abstract

It is the appropriate and accurate translation of the Spanish abstract into the English language. There is not a word limit, but its contents should not be extended unnecessarily, except for the need to express its original idea adequately.

Keywords

An appropriate and accurate translation of the list of the keywords should be provided.

Introduction

Its length should not exceed 3 pages. It should include an updated review of the relevant literature, where the importance of the study must be highlighted. The background, the context where the study is situated, theoretical framework, methods used, and the contribution of the study, which are often considered essential to understand the scope of the research, can be provided in a concise manner within this section. The section should conclude with a description of the main aims of the study.

Materials and methods

The Materials and Methods section needs to provide sufficient information in a way that the study can be replicated or that its credibility can be assessed. The experimental design (if applicable), statistical method, data sources and techniques of analysis used need to be clearly indicated. In case specimens are used, the procedures followed to gain access to them need to be clearly described.

Brand names, year and origin (city and country) of the research devices used for the study need to be clearly indicated. All the ethical considerations related to research that involves persons or animals should be clearly discussed.

The identity and personal data of the participants in the study need to be protected, securing the informed consent from the involved parties before the dissemination of any confidential information.

In the case of health related studies, a reference needs to be made to the Ethics committee that approved the research protocol. Furthermore, in the case of those studies whose research subjects are humans, copies of the signed informed consent forms need to be provided. In all the cases, studies in which humans are involved must adhere to the ethical guidelines for human experimentation as stated in the 1975 Declaration of Helsinki.

In the case of the studies that make use of animals for experimentation, all the appropriate measures implemented to minimize pain and uneasiness need to be clearly indicated. In addition, a declaration identifying the ethics committee that approved that research methodology needs to be provided in the methods section. Similarly, when animals are used in clinical trials, the informed consent from their owners or customers needs to be gained and explicitly declared in the document.

The experiments and clinical trials with persons or animals should be conducted following the guidelines established by the National Health Institute (National Health Institute) of the USA, particularly those related to the care and use of animals in experimentation procedures. Alternatively, the guidelines for ethical practice developed by the European Community Council dated November 24, 1986 (86/609/EEC) can also be followed in accordance with national and local laws and regulations. The editors of the journal reserve the right to reject those works that appear to have failed to secure an adequate informed consent from the involved parties or to apply appropriate procedures.

The results and discussion sections can be presented separately.

The main findings should be presented and related to current literature in a way that justifies the innovative contribution that the study makes to the advancement of knowledge.

Conclusions

The main contributions of the study should be highlighted in a clear and concrete manner, avoiding the repetition of discussion of previous findings.

Conflict of interests

Authors are required to declare any potential sources of conflict of interest such as being the recipients of funding either now or in the past from a business or institution which can positively influence the outcomes of the research. Likewise, any adverse feeling towards enterprises, institutions or groups that can negatively affect the outcomes of the research should also be declared. We recommend that you consult our (conflict of interest policy).

Acknowledgements

In case the authors received any financial support for their study, they should provide details such as the name of the funding agency and grant number.

References

At least 40% of all the references used in the article should be from the last 5 years. Please see the instructions for the list of references (backside of this document).

Structure of literature reviews

Manuscripts in the form of literature reviews must have a maximum of 20 pages in length (including figures and tables) and will include the following sections:

Title

The title should clearly describe the contents of the article within a length of 150 characters in Spanish (without spaces).

Title

It is the appropriate and accurate translation of the Spanish title into the English language.

Short title (Spanish).

Authors should also provide a shorter version (maximum 6 words) of the manuscript title.

Abstract

The abstract in Spanish must not exceed 250 words, including a description of the topic being reviewed, its relevance and scope. It should be composed of three elements: a brief introduction, the main aim(s) and a conclusion that includes the contribution of it.

Keywords

A list of three to five keywords should be included.

Abstract

It is the appropriate and accurate translation of the Spanish abstract into the English language. There is not a word limit, but its contents should not be extended unnecessarily, except for the need to express its original idea adequately.

Keywords

An appropriate and accurate English translation of the list of the keywords should be provided.

Introduction

It is the first part of the manuscript and should contain a discussion of the topic being addressed, its significance, justification, and, if relevant, the context where the study is situated, theoretical framework and the methods used, which are often considered essential to understand the scope of the research, can be provided in a concise manner within this section. The section should conclude with a description of the main aims of the study.

This section should be followed by the body of the document, which should be divided into sections based on the themes under consideration.

Sections

A broad and critical review of the literature is expected in a way that allows the readers to deepen their understanding of the most recent advancement of the topic being addressed. Therefore, at least 50 % of the references cited in each section (including the introduction) should have been published within the last 5 years, placing emphasis on studies published during the current or last year.

Conclusions

The main contributions to knowledge in the field should be highlighted in a clear and concrete manner, avoiding the repetition of any analysis previously discussed in the body of the document.

References

At least 50 % of all the references used in the article

should be from the last 5 years. Please see the instructions for the list of references (backside of this document).

Conflict of interests

Authors are required to declare any potential sources of conflict of interest such as being the recipients of funding either now or in the past from a business or institution which can positively influence the outcomes of the research. Likewise, any adverse feeling towards enterprises, institutions or groups that can negatively affect the outcomes of the research should also be declared. We recommend that you consult our (conflict of interest policy).

Acknowledgements

In case the authors received any financial support for their study, they should provide details such as the name of the funding agency and grant number.

Additional aspects

Abbreviations and acronyms

Word or phrases that will be used frequently throughout the manuscript can be replaced by their abbreviations, preferably by those which are commonly used in the field, e.g. water retention capacity (WRC), body mass index (CMI). Similarly, the use of abbreviations that are generated specifically for the study is also allowed, as long as they are previously described, e.g. work stress questionnaire (WSQ).

In case English acronyms are used in the names of questionnaires or any measurement method or instrument, authors are expected to indicate what they stand for in the first place. For example, For example, cuestionario de control de la imagen corporal en fotografías (BICP, por sus siglas en inglés: body image control in photos questionnaire); secuenciación de siguiente generación (NGS, por sus siglas en inglés: next generation sequencing). In addition, the names of organizations should be described, e.g. la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA, por sus siglas en inglés: Food and Drug Administration).

Measurement units

The units of any scientific or lab data and their abbreviation should adhere to the international system of units (SI) described by the Spanish Metrology Center Centro Español de Metrología (Ninth edition). No dots should be used in the abbreviations (e.g. kg, cm, °C, or m). The units in degrees and the % symbol must be separated from the numbers: 27 °C, 83 %.

The units should be used as shown in the following format: rad/s, not in rad * s⁻¹. Another example: kg/m³ instead of kg m⁻³ (kg x m⁻³ o kg * m⁻³).

Citations

All publications cited in the text of the article must appear in the references section and vice versa. Authors are expected to adhere to the APA 7th edition guidelines in Spanish, except for the use of et al., which is a Latin abbreviation for "and others", and the format "y col." should be used. Authors must verify that the names of the authors and dates cited in the text are exactly the same as those in the list of references. Authors must also make sure that all the elements of bibliographic references are included. It is the responsibility of the author(s) to verify the correct spelling of authors' names cited in articles or literature reviews.

Citations or references inserted in the corresponding places in the text must be placed in parenthesis, contain the last name of the author and include the year of publication. For example: (Martínez, 2015). It is also possible for authors to use their hyphenated last names (Martínez-González, 2019). (Núñez y Pérez, 1983; Núñez y col., 1984). (Núñez y Pérez, 1983a; 1983b).

In the case of two authors, the format (Martínez y Gómez, 2014) should be used.

To indicate more than two authors, (Martínez y col., 2014) should be used.

In case of more than one reference, they should be separated with semi colon, and need to be placed in alphabetical order based on year of publication (from oldest to newest) (Martínez y Gómez, 2012; Martínez y col., 2014).

If two or more citations are from the same year of publication, they will have to be placed in alphabetical order (Martínez y Gómez 2012; Martínez y Hernández, 2012; Miranda, 2012).

When a citation is used out of the parentheses, it should be separated by a comma or with the conjunction “y” (and), if applicable, e.g. Gallegos y Elgier (2020), Torralbas (2020) y Rodríguez y col. (2021), who argued that...

If there are two references of the same authors in the same year of publication, small letters in alphabetical order are used to avoid confusion (Martínez y Gómez, 2014a; 2014b).

Textual citations (entirely copied text) that contain 40 or fewer words will be placed in quotation marks and will include, in addition to the author(s) name and year of publication, the page number(s). For example, “The placebo effect disappeared when...” (Martínez, 2015: 126); Martínez (2015), found that: “The placebo effect disappeared when...”

In case a secondary source (which should be used only when the original item is no longer available or only available in another language) is used, the following format should be used: tomada del informe bienio (2008-2009), Observatorio Iberoamericano de Economía Social y Cooperativa (oibes-coop) citado en Chaves-Avila y Pérez-de-Uralde (2012) y Chaves-Avila y col. (2013) (Tabla 3). The secondary source must also be included in the reference list.

When using corporate authors such as institutes or ministries or organizations among others, acronyms must be spelled out the first time they are cited in the text. Example: according to reports provided by the Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS, 2015)..... Only the acronym will be cited subsequently (IMSS, 2015).

In addition, if acronyms in English are used, they must be spelled out the first time they are cited in the text, e.g. According to the Asociación Americana de Antropología (AAA, por sus siglas en inglés): The American Anthropological Association (AAA, 2008).

Legal material texts are cited as follows: The Mexican constitution (2008), in its 27 article, establishes that “The property of land and water comprised within the national territory boundaries originally corresponds to the Nation”...

In personal communications, letters, and emails, additional information to that suggested by the APA style should be provided to justify its origin, e.g. (Luis Fuentes-García, procesador de jaiba en Tampico, Tamaulipas, comunicación personal, 12 de junio, 2015).

If the information provided through a personal communication is available in a retrievable document, its source should be cited, e.g. (Fuentes, 2015). It should also be included in the list of references alongside its file format.

No references or notes should be included as footnotes.

No theses, instruction manuals, book notes or any other hard to find material should be cited.

References

A list of all the references used in the text must be provided at the end of the manuscript in alphabetical and chronological order indenting the first line (1.25 cm), as shown in the examples of this section.

Scientific articles

Aburto, J. M., Schöley, J., Kashnitsky, I., Zhang, L., Rahal, C., Missov, T. I., Mills, M. C., Dowd, J. B., & Kashyap, R. (2022). Quantifying impacts of the COVID-19 pandemic through life-expectancy losses: a population-level study of 29 countries. *International Journal of Epidemiology*, 51(1), 63-74. Agregar el identificador de objeto digital (Digital Object Identifier: DOI)*

Bustos, G. y Pérez, R. (2018). Relación entre factores psicosociales y el Índice de Función Sexual Femenina en población rural de la comuna de Teno, región de Maule. *Perinatología y Reproducción Humana*, 32(1), 9-18. DOI

Chao, A. & Jost, L. (2012). Coverage based rarefaction and extrapolation: standardizing samples by complete-

ness rather than size. *Ecology*, 93(12), 2533-2547. DOI

Figuroa, K. M. (2020). Tratamientos psicológicos para mejorar la vida sexual en mujeres supervivientes de cáncer ginecológico: revisión sistemática. *Psicooncología*, 17(2), 293-309. DOI

González, R. (2016). Presentación: la perspectiva y el debate acerca de una economía cooperativa, solidaria y autogestionaria como centro de una economía social. *Revista de la Academia*, (21), 5-29. DOI

Tejada, K., González, A., Carty, E. y Camarena, F. (2023). Abundancia y diversidad de aves playeras en la playa El Agallito, distrito de Chitré, provincia de Herrera. *Tecnociencia*, 25(1), 41-62. DOI

Generally speaking, the citations should follow the APA 7th edition guidelines, with the following specifications:

References should include up to 20 items. In references with 2 to 20 authors the conjunction “y” to indicate the last author in citations of published material in Spanish and a comma followed by the “&” symbol (, &) to indicate the last author in citations in English.

In citations with 21 or more authors, the first 19 authors should be mentioned in the order in which they appear, followed by three dots...and the last author, without the “y” conjunction or the “&” symbol.

Note 1: in continuous publication journals, which assign page numbers, the following format should be used: *PLoS ONE*, 14(9), Article e0222224. DOI

*Note 2: in case the reference contains a DOI, it should be provided as used in the original source.

Books

Print book

Ruiz, C. P. (2021). La culpa en la mujer. Una emancipación pendiente. Síntesis.

Online book

Arias, S. y D. Aquino. (2019). Familia Cactaceae I. Flora del Bajío y de regiones adyacentes. Fascículo 209. Instituto de Ecología, A.C. DOI o Agregar el localizador de recursos uniforme (Uniform Resource Locator: URL).

Book with an editor

Alanís-Rodríguez, E., Mora-Olivo, A. y Marroquín-de-la-Fuente, J. S. (Eds.) (2020). *Muestreo ecológico de la vegetación*. Editorial Universitaria de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Book chapters

Quintero, Y. y Del-Carpio, P. (2020). Encuentros y desencuentros en la familia tras el COVID-19. En Y. del-Valle, D. Alvarez, J. Batista y D. Rojas (Eds.), *Impacto del COVID-19 desde la perspectiva socio-económica en el contexto global* (pp. 31-34). Fondo Editorial Universitario Servando Garcés de la Universidad Politécnica Territorial de Falcón Alonso Gamero y ALININ. URL o DOI

Viter, R. & Latsunskyi, I. (2019). Metal oxide nanostructures in sensing. In O. V. Zenkina (Ed.), *Nanomaterials design for sensing applications* (pp. 41-91). Elsevier.

Newspaper articles

Carreño, L. (9 de febrero de 2020). La disputa gremial por los aranceles a las prendas de vestir. *El Espectador*. <https://www.elespectador.com/economia/la-disputa-gremial-por-los-aranceles-las-prendas-de-vestir-articulo-903768>

Interviews

Nacif, B. (2018). Presidente de la Comisión de Prerrogativas del Instituto Nacional Electoral (INE), Ciudad de México, México.

Websites and electronic books

National Cancer Institute (2019). SEER Cancer Stat Facts. [En línea]. Disponible en: <https://seer.cancer.gov/statfacts/html/mulmy.html>. Fecha de consulta: 10 de agosto de 2022.

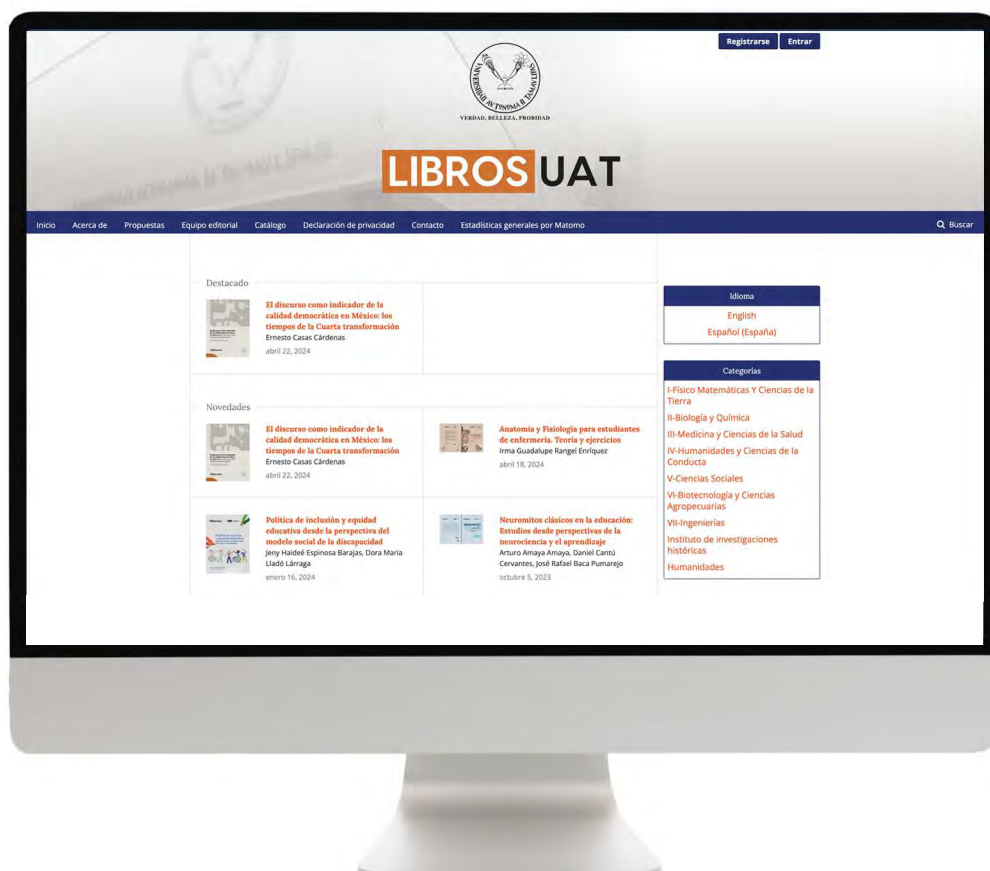
When the reference is from a PDF file document

Rodríguez, R. (2019). Una guía para combatir el Bullying [Archivo PDF]. [En línea]. Disponible en: <https://www.url.com>. Fecha de consulta: 3 de febrero de 2023.

La **UAT** invita a SUS profesores e investigadores a difundir SUS libros académicos a través del portal **<http://libros.uat.edu.mx>**

Ventajas

- Visibilidad internacional
- Descargable en PDF
- Compartir en redes sociales
- Incrementan las citas
- Posibilidad de colaboraciones
- Invitaciones a eventos académicos



Catálogo



Índice de vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado

Valeria Vanessa Lugo García, René Bernardo Elías Cabrera Cruz, Julio César Rolón Aguilar, Roberto Pichardo Ramírez

octubre 10, 2025



El empleo, el salario y los niveles de bienestar de las familias de Reynosa, Tamaulipas

Olegario Méndez Cabrera, Jimena Sánchez Saavedra

octubre 10, 2025



Anatomía y fisiología para estudiantes de enfermería: nivel avanzado

Irma Guadalupe Rangel Enríquez, Juan Manuel Ramírez Carrizalez

octubre 10, 2025



Microbiota en la infancia temprana y su impacto inmunológico: un enfoque multidisciplinario

Raúl de León Escobedo, Brian González Pérez, Ricardo Salas Flores, José Eugenio Guerra Cárdenas

octubre 9, 2025



Tópicos básicos de comercio exterior

María Josefina Hernández Barrera, Humberto Rubén Dragustinovis Perales

octubre 9, 2025



Tópicos de ginecología

Jaime Paz Ávila

octubre 9, 2025



Pensar en conservación patrimonial del diseño gráfico arquitectónico latinoamericano

Rebeca Isadora Lozano Castro

agosto 15, 2025



El maíz (Zea mays): un tesoro alimenticio

Verónica Hernández Robledo

agosto 15, 2025



El general Bernardo Reyes. La peculiar y fallida integración al gobierno interino de Francisco León de la Barra y al gobierno constitucional de Francisco I. Madero 1909-1913

José Carlos Mora García, Edy Izaguirre Treviño

agosto 15, 2025



Comunicación, resiliencia y responsabilidad social ante los retos del cambio climático: un enfoque transdisciplinar

María Eugenia Rosas Rodríguez, Lidia Rangel Blanco, Gabriela Clemente Martínez

agosto 15, 2025



**s de superficies sólidas:
conceptos y aplicaciones**

Josué F. Pérez Sánchez, Edgardo J. Suárez Domínguez, Elena F. Izquierdo Kulich
agosto 7, 2025



**Las siete herramientas de calidad
aplicadas a la ingeniería industrial**

Mario Alberto Morales Rodríguez, Gabriela Cervantes Zubirás
agosto 7, 2025



**La práctica clínica en enfermería:
resultados de la movilidad académica**

Cintha Patricia Ibarra González, Artemisa Sánchez Leo, Rosa Elvia Montoya García (+)
agosto 7, 2025



**Sentido de comunidad. La experiencia
de estudiantes en línea**

Enrique Bonilla Murillo
julio 14, 2025



Agua, suelo agrícola e hidrocarburos

Enoc Alejandro García Rivera
julio 14, 2025



**Elaboración de tesis: una guía para
estudiantes y docentes**

Enrique Bonilla Murillo, Verónica Sagnité Solís Herebia, Julio César González Mariño
julio 14, 2025



**Metodología de investigación en
diseño gráfico desde un enfoque
sustentable. Del problema a la
solución**

Ma. Luisa Montes Rojas, Jaqueline González Vélez, María Luisa Pier Castelló
julio 14, 2025



**Catálogo fotográfico de los mamíferos
de Tamaulipas**

Leroy Soria-Díaz, Claudia C. Astudillo-Sánchez, Carlos Barriga-Vallejo
julio 10, 2025



**Voces sostenibles: intersecciones
entre los medios públicos y del tercer
sector en México**

César Bárcenas Curtis, María Consuelo Lemus Pool
julio 10, 2025



**Los nutrientes en la prevención y
tratamiento del COVID-19**

Rocío Margarita Uresti Marín, Gonzalo Velázquez de la Cruz
julio 9, 2025

Revista arbitrada e indexada en bases de datos internacionales



Journal Citation Reports™



Semantic Scholar



Envía tus colaboraciones científicas a:

cienciauat@uat.edu.mx

CienciaUAT



VERDAD, BELLEZA, PROBIIDAD